

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Přesné měření teploty a vlhkosti v laboratorních  
aplikacích**

Precise Measurement of Temperature and Humidity in  
Laboratory Applications

**2018**

**Michal Svrčina**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Svrčina**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik  
Téma: **Přesné měření teploty a vlhkosti v laboratorních aplikacích**  
**Precise Measurement of Temperature and Humidity in Laboratory Applications**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou měření teploty a vlhkosti.
2. Seznámení se s možnostmi měřicího modulu Sensitron.
3. Návrh a realizace měření a vizualizace teploty a vlhkosti.
4. Provedení měření a testů.
5. Zhodnocení výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] CHMELÁŘ, M., A. DRASTICH a J. ROZMAN. *Lékařská přístrojová technika 2*. 1. vyd. Praha : Nakladatelství techn. lit., 1984. 179 s.
- [2] CHMELÁŘ, Milan. *Lékařská přístrojová technika I*. Brno: CERM, 1995. 192 s. ISBN 80-8586-763-X.
- [3] BRONZINO, Joseph D. et al. *The biomedical engineering handbook*. Boca Raton(USA): CRC Press, 1995. 2896 s. ISBN 0849383463/978-0849383465.
- [4] SVATOŠ, Josef. *Biologické signály I*. Praha: ČVUT Praha, 1998. 202 s. ISBN 8001018229.
- [5] PENHAKER, Marek, Martin IMRAMOVSKÝ, Petr TIEFENBACH a František KOBZA. *Lékařské diagnostické přístroje: učební texty*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 320 s. ISBN 80-248-0751-3.
- [6] CARR, Joseph J. a John M. BROWN. *Introduction to biomedical equipment technology*. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, c2001, xv, 743 s. ISBN 0-13-010492-2.
- [7] MACKAY, Stuart R. *Bio-medical telemetry: sensing and transmitting biological information from animals and man*. 2nd ed. New York: IEEE Press, c1993, xiv, 540 s. ISBN 0-7803-4718-8.
- [8] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, c2010, xv, 663 s. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [9] WEBSTER, John G. a John W. CLARK. *Medical instrumentation: application and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, c1998, xix, 691 s. ISBN 0-471-15368-0.
- [10] PEREZ, Reinaldo. *Design of medical electronic devices*. San Diego: Academic Press, c2002, xi, 279 s. ISBN 0-12-550711-9.
- [11] MALMIVUO, Jaakko a Robert PLONSEY. *Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*. New York: Oxford University Press, 1995, 512s. ISBN 0195058232, ISBN 978-0195058239.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Marek Penhaker, Ph.D.**

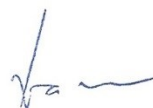
Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



---

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení**

*„Souhlasím s tím, že s výsledky mé bakalářské práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a vedoucího katedry. V případě publikace budu uveden jako autor.*

*Prohlašuji, že na celé bakalářské práci jsem pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.“*

*V Ostravě 2018*

  
.....  
Michal Svrčina

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto velmi poděkovat panu Ing. Marku Penhakerovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a odborný dohled při vedení mé bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je získání potřebných znalostí a podkladů k navržení a realizaci softwarového programu pro přesné měření relativní vlhkosti vzduchu, rosného bodu a teploty v laboratorních aplikacích okolního prostředí. V teoretické části této práce se seznámíme s definicí teploty a její rozdělení, definicí vlhkosti, druhů vlhkosti, a také metodami měření vlhkosti. Realizace programu je tvořena pomocí měřicího modulu od firmy Sensirion s typovým označením EK-H5. Součástí kitu Sensirion je také senzor SHT21, který je založen na principu kapacitního typu snímače vlhkosti, snímače teploty, zesilovače, převodníku A/D a paměti. Aplikace je schopná vyhodnocovat měření vlhkosti v reálném čase s přesností 1% RH, a také výpočet rosného bodu s naměřených hodnot a snímání teploty okolního prostředí s přesností 0,1 °C. Při zpracování dat dochází současně k výpočtu maximální, minimální a průměrné hodnoty v reálném čase. Součástí aplikace je také vykreslování měřicích hodnot v grafu v reálném čase a možnost uložení souboru ve formátu .xlsx, kde dochází k uložení naměřených dat a poté možností jiného zpracování a vizualizací dat.

## **Klíčová slova**

sensor SHT21, teplota, vlhkost, vlhkoměry, metody měření vlhkosti, rosný bod, I2C, teploměr, C#

## **Abstract**

The aim of this bachelor thesis is to acquire the necessary knowledge and background for the design and implementation of a software program for accurate measurement of relative humidity, dew point and temperature measurement of the environment in laboratory applications. In the theoretical part of this work we will get to know the definition of temperature and their distribution, the definition of moisture and moisture types, as well as the methods of moisture measurement. The implementation of the program consists of a sensor module from Sensirion with the type designation EK-H5. Sensirion also includes a SHT21 sensor based on the capacitive type of humidity sensor, temperature sensors, amplifier, A/D converter and memory. The application is capable of evaluating humidity measurement with accuracy of 1% RH, in real time, also to calculate dewpoint with measured values and ambient temperature sensing with accuracy of 0.1 °C. When data is processed, the maximum, minimum, and average values are calculated in real time. Part of the application is also plotting real-time measurement values in the graph and saving the .xlsx file where the measured data is stored, and then other data processing and visualization options.

## **Keywords**

sensors SHT21, temperature, humidity, hygrometers, moisture measurement methods, dew point, I2C, thermometer, C#

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Měření teploty a vlhkosti .....</b>	<b>2</b>
2.1	Definice Teploty.....	2
2.1.1	Kapalinové teploměry .....	2
2.1.2	Kovové teploměry .....	2
2.1.3	Termoelektrický článek.....	3
2.1.4	Polovodičové odporové teploměry.....	4
2.1.5	Bezdotykové Teploměry .....	5
2.2	Definice vlhkosti .....	5
2.2.1	Absolutní vlhkost .....	5
2.2.2	Relativní vlhkost .....	6
2.2.3	Měrná vlhkost.....	6
2.2.4	Rosný bod.....	7
<b>3</b>	<b>Metody měření vlhkosti .....</b>	<b>8</b>
3.1	Psychrometrická metoda .....	8
3.2	Hygrometrická metoda .....	9
3.2.1	Gravimetrické vlhkoměry .....	9
3.2.2	Dilatační vlhkoměry .....	9
3.2.3	Odporové vlhkoměry.....	10
3.2.4	Kapacitní teploměry .....	11
3.2.5	Vlhkoměry s vyhřívanými termistory .....	12
<b>4</b>	<b>Měřicí modul Sensirion EK-H5 .....</b>	<b>13</b>
4.1	Senzor SHT21 .....	13
<b>5</b>	<b>Návrh a realizace vizualizační aplikace.....</b>	<b>16</b>
5.1	Vizualizační prostředí Visual Studio – Windows Forms Application .....	17
5.2	I2C.....	18
5.3	Komunikace se zařízením .....	18
5.3.1	Knihovna IO-Warrior .....	18
5.3.2	SDK (software development kit).....	19

5.3.3	Přenosová rychlost .....	21
5.4	Výsledná realizace a popis jejích částí .....	22
<b>6</b>	<b>Provedení měření a testů .....</b>	<b>28</b>
6.1	Referenční teploměr Fluke 1523 .....	28
6.2	Voltcraft DT – 8820 .....	32
<b>7</b>	<b>Zhodnocení výsledků měření.....</b>	<b>34</b>



## Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka		Význam
P	—	tlak
kB	—	Kilo byte
MB	—	Mega byte
$\Phi$	absolute humidity	Absolutní vlhkost vzduchu
IMU	Inertial measurement unit	Inerciální měřicí jednotka
$\text{g.m}^{-3}$	—	Krychlový metr
$\varphi$	relative humidity	Relativní vlhkost
$\chi$	specific humidity	Měrná vlhkost
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit	multi-masterová počítačová sériová sběrnice, používána k připojování nízko rychlostních periférií k základní desce systému
SoC	System on a Chip	System na čipu, integruje všechny součásti počítače nebo jiného elektronického systému do jediného čipu.
$\lambda$	—	relativní prodloužení odmaštěného svazku lidských vlasů
SPI	Serial Peripheral Interface	Sériové periferní rozhraní
USB	Universal Serial Bus	univerzální sériová sběrnice pro připojení komponent k počítači
LINQ	Language Integrated Query	je integrovaný jazyk .NET Frameworku pro dotazování, představení jednotné syntaxe pro přístup k datům.
SCL	Synchronous Clock	synchronní hodiny
SDA	Synchronous Data	synchronní data
DIO	Digital Input/Output	Digitální vstup/výstup
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Národní úřad pro oceán a atmosféru

## Obrázky

Obr. 1 - Vlasový hygrometr .....	10
Obr. 2 - Odporový hygrometr .....	11
Obr. 3 - Závislost kapacity čidla na relativní vlhkost vzduchu. ....	11
Obr. 4 - Kapacitní vlhkoměr. ....	12
Obr. 5 - Modul Sensirion EK-H .....	13
Obr. 6 - Přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu senzoru SHT21. ....	14
Obr. 7 - Přesnost měření teploty vzduchu senzoru SHT21 .....	14
Obr. 8 - Výstup senzoru SHT 21 - komunikace I2C .....	15
Obr. 9 - Zapojení systému pro měření vlhkosti a teploty pomocí senzoru SHT21 .....	16
Obr. 10 - Windows forms Aplikace .....	17
Obr. 11 - Základní sada příkazu ve dvojkové soustavě.....	21
Obr. 12 - Vývojový diagram aplikace .....	22
Obr. 13 - Připojení senzoru .....	23
Obr. 14 - Záznam dat a uložení .....	23
Obr. 15 - Vytvoření excel souboru.....	24
Obr. 16 - Grafy aplikace.....	25
Obr. 17 - Měření teploty, vlhkosti a výpočet rosného bodu.....	26
Obr. 18 - Hlavní okno PC aplikace .....	27
Obr. 19 - Fluke-1523 a Voltcraft DT-8820 .....	28
Obr. 20 - Referenční teploměr 1523 a PC aplikace.....	29

## Tabulky

Tabulka 1 - Specifikace senzoru SHT21 .....	15
Tabulka 2 - Specifikace referenčního teploměru Fluke 1523 .....	29
Tabulka 3 - Měření teploty v laboratoři s SHT21 a Fluke 1523 .....	30
Tabulka 4 - Měření venkovní teploty z laboratoře.....	31
Tabulka 5 - Měření teploty pomocí Voltcraft DT-8820 a senzoru SHT21 .....	32
Tabulka 6 - Měření vlhkosti pomocí Voltcraft DT-8820 a senzoru SHT21 .....	33

## Grafy

Graf 1 - Absolutní chyba měření teploty v laboratoři .....	30
Graf 2 - Absolutní chyba teploty venkovního měření .....	31
Graf 3 - Absolutní chyba měření vlhkosti v laboratoři .....	33

# 1 Úvod

S vlhkostí nebo teplotou vzduchu se setkáváme každou sekundu našeho života, aniž bychom o tom věděli, nebo si tuto skutečnost uvědomovali. Je totiž obsažená ve vzduchu, který je přitom všude na Zemi, a určuje množství vodní páry. Vodní pára je v plynném skupenství a nemůžeme ji vidět nebo cítit. Při určité teplotě vzduchu je vzduch schopen pojmout určité množství vodní páry. Čím více je vzduch oteplován tím více vlhkosti (vodní páry) je schopen pojmout, ale pokud teplota vzduchu klesne na určitý bod a vzduch již není schopen pojmout původní množství vlhkosti, přebytek se vyloučí jako zkapalněná vodní pára. Toto se dá vypočítat, když hodnota dosáhne tzv. rosného bodu (relativní vlhkost 100%) a při zemi se vytvoří rosa. Vlhkost lze měřit určitými přístroji a určitým způsobem (za pomoci vzorců nebo tabulek), je vypočitatelná. Jednoduše řečeno se jedná o důležitou meteorologickou veličinu, která má velký vliv na tvorbu oblačnosti a srážek (pokud bude vzduch a relativní vlhkost vyšší, tím více se bude tvořit oblačnost). Pokud je vlhkost vzduchu vysoká, tak při vysokých teplotách se projevuje jako dusno. Proto se tato práce zabývá přesným měřením vlhkosti vzduchu, teploty a výpočtem rosného bodu pomocí zařízení EK-H5 od společnosti Sensirion a čidla s označením SHT21. Měřením a udržováním relativní vlhkosti v bytech nebo v rodinných domech je poměrně důležitá věc, která by se neměla zanedbávat, jelikož s nízkou hodnotou relativní vlhkosti může způsobovat vysychání sliznic horních cest dýchacích a z toho pramenících zánětů nosohltanu, onemocnění horních i dolních cest dýchacích, u dětí se objevuje velmi často laryngitida, záchvaty alergií, anebo také pálení očí. Naopak u vysokých hodnot hrozí vznik plísní, proto by se měla hodnota vlhkosti udržovat mezi 45 a 55 %.

## 2 Měření teploty a vlhkosti

### 2.1 Definice Teploty

Teplota se dá měřit pouze nepřímo na základě známých fyzikálních jevů za různých teplot. V moderních elektronických přístrojích se k měření teploty používá převážně polovodičových prvků – **termistorů**, což je polovodičová součástka, jejíž odpor je závislý na teplotě. Termometrie se proto provádí několika způsoby, založenými většinou na objemové roztažnosti kapalin nebo délkové roztažnosti pevných látek za různé teploty. K měření teploty je zavedena teplotní stupnice, definovaná řadou 11 pevných základních teplotních bodů. Podle principu, který je využitý k měření teploty, rozdělujeme teploměry na dilatační, odporové, termoelektrické teploměry (termočlánky) a teploměry využívající jiných principů. Nejpresnější je intrakavitální měření, tj. rektálně, vaginálně, orálně.[1][2]

Z praktického hlediska naměření vyšší axilární teploty s vysokou pravděpodobností predikuje vyšší hodnotu rektální, ale normální axilární teplota nevyklučuje vyšší hodnotu rektální. Při pochybnostech o axilární teplotě je proto nutno pacienta přeměřit rektálně.[1]

#### 2.1.1 Kapalinové teploměry

Kapalinový teploměr je teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny (rtuť, líh apod.). Teplotní objemová roztažnost je jev, při kterém se látka zahřátá o určitou teplotu zvětší o určitý objem. Změna objemu tělesa nastává proto, že při změně teploty se v důsledku délkové roztažnosti mění všechny rozměry tělesa. To způsobuje změny objemu závislé na teplotě, tedy teplotní objemovou roztažnost. Objemová roztažnost se uplatňuje u pevných látek, kapalin i plynů. Pro malé teplotní rozdíly lze vztah mezi změnou objemu a změnou teploty zapsat ve tvaru:

$$\Delta V = \delta V_0 \Delta t, \text{ kde}$$

$\Delta V [M^3]$ .....velikost objemové změny,

$\Delta [K^{-1}]$ .....součinitel objemové teplotní roztažnosti,

$\Delta t [^{\circ}C]$ .....velikost změny teploty.

U lékařských skleněných lihových teploměrů (35 až 42 °C) je kapilára nad nádobkou s lihem zúžena, takže se v tomto místě při poklesu teploty lihový sloupec přetrhne a teploměr tak stále ukazuje maximální naměřenou teplotu (před dalším použitím se musí „sklepnout“). Výhody jsou v jednoduchém provedení, nízké ceně, přímém čtení údajů, v téměř rovnoměrné stupnici, přesnosti měření, dlouhodobé stabilitě. Nepotřebují napájení el. energií. [2]

#### 2.1.2 Kovové teploměry

Kovové teploměry jsou konstruovány jako jedno kovové (monometalické), které si příliš nepoužívají, nebo častější dvojkovové (bimetalické). Bimetalický teploměr obsahuje pásek, svaření ze dvou kovů, které se co nejvíce liší svou teplotní roztažností, například se používají dvojice kovů invar-

měď, invar-ocel, invar-mosaz. Ohřátím se pásek prohýbá na stranu kovu s menší tepelnou roztažností. Volný pásek se jednak spojuje mechanickým převodem s ukazatelem na stupnici a jednak lze umístit do určité vzdálenosti mechanické spínací zařízení, které při doteku mechanického pásku vypne topení. Nastavením tohoto vypínače do různé vzdálenosti od pásku lze měřit regulovanou teplotu. Hodí se jen k hrubé regulaci v rozmezí několika stupňů (například v sušárnách a sterilizátorech). Bimetalické teploměry sice nejsou příliš přesné, ale jsou odolné a jednoduché.[3]  
Pro malé teplotní rozdíly lze vztah mezi změnou délky a změnou teploty zapsat ve tvaru:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$$

$\Delta l$  [mm].....velikost délkové změny,

$\alpha$  [ $K^{-1}$ ].....součinitel délkové teplotní roztažnosti,

$\Delta t$  [ $^{\circ}C$ ].....velikost změny teploty.

### 2.1.3 Termoelektrický článek

Termoelektrické články měří teplotu na základě termoelektrického jevu. Ten funguje na principu, že v uzavřeném elektrickém obvodu dvou vodičů z různých kovů, kdy má každý různou teplotu, teče elektrický proud. Pokud tento obvod rozpojíme, jsme schopni měřit hodnoty termonapětí, které jsou dány rozdílem teploty mezi spoji. Pro praktické užití termočlánku se jeden vodič dá do prostředí s referenční teplotou (v praxi teplota místnosti, cca  $25^{\circ}C$ ) a druhý se vloží do prostředí, kde chceme teplotu změřit. Voltmetrem se poté měří hodnota termonapětí mezi spoji, s přesností na setiny stupňů Celsia.[2]

Zmíněné termonapětí je kvadratickou funkcí teploty. V případě jeho využití v medicíně, kde je rozsah teplot jen od  $20^{\circ}C$  do  $50^{\circ}C$ , můžeme danou lineární závislost vyjádřit pomocí vztahu:

$$U_{AB} = k * (t_A - t_B), \text{ kde}$$

$U_{AB}$  .....termonapětí mezi referenčním a měřicím bodem termočlánku,

$t_A$  a  $t_B$  .....jsou teploty těchto bodů,

$k$  ..... kalibrační konstanta závisící na typu termočlánku.

V medicínských aplikacích jsou nejpoužívanější hlavně termočlánky měď-konstantan (kalibrační konstanta  $40 \mu V/K$ ) nebo mangan-konstantan. Přesnost měření teploty pomocí termočlánku závisí na citlivosti voltmetru měřícího termonapětí a na přesnosti měření teploty studeného konce termočlánku. Výhodou termočlánků je miniaturizace, proto se v lékařství používají jako invazivní měřiče teploty, např. pro účely hypertermie.

Termočlánek je tedy snímač pro měření teploty sestávající ze dvou různorodých kovů (a, b) spojených do jednoho bodu. Když je tento spoj dvou kovů zahříván nebo chlazen, vzniká napětí úměrné k teplotě (Seebeckův jev). Termočlánekové slitiny jsou dodávány jako dráty. Pro správnou

funkci snímače je nutné, aby teplota srovnávacího spoje byla konstantní a  $t_1 > t_2$ , nebo aby vliv termoelektrického napětí tohoto spoje byl kompenzován.[2]

Seebeckův jev je přeměna teplotních rozdílů přímo na elektrické napětí. Je v něm vznik napětí, který nastává při teplotních rozdílech mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. To způsobuje nepřetržité proudění elektronů, pokud vodiče vytvoří uzavřený obvod. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.[2]

Platí vzorec:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT, \text{ kde}$$

$S_A$  a  $S_B$ .....Seebeckovy koeficienty kovů A a B [-]

$T_1$  a  $T_2$ .....teploty spojů [°C]

#### 2.1.4 Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové odporové snímače teploty využívají změny svého odporu v závislosti na teplotě, přičemž tato závislost je velká, nelineární a vyplývá ze změny koncentrace nosičů náboje polovodiče na teplotě, obdobně jako kovové odporové teploměry. U polovodičů je dominantní teplotní závislostí koncentrace nositelů náboje. Rozdělují se na termistory a monokrystalické odporové teploměry.

Na rozdíl od kovových odporových teploměrů se mohou elektrické vlastnosti měnit dvěma způsoby, podle charakteru změny odporu na teplotě:

- Negastory – se vzrůstající teplotou jejich odpor klesá (negativní teplotní koeficient odporu  $\alpha$  - Negative Temperature Coefficient)
- Pozistory – se vzrůstající teplotou jejich odpor stoupá (pozitivní teplotní koeficient odporu  $\alpha$  - Positive Temperature Coefficient)

Termistory NTC (negastory) se vyrábějí práškovou technologií ze směsi oxidů kovů, např.  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ . Vylisovaná čidla se zpevňují slinováním za vysokých teplot. NTC se též vyrábí tenkovrstvými technologiemi. Mezi ně patří NTC termistor  $\text{SiC}$  pro rozsah teplot od  $-100^\circ\text{C}$  do  $+450^\circ\text{C}$ . K měření teploty se používá perličkových termistorů. Závislost odporu negastoru na teplotě je přibližně exponenciální. Negastory jsou pro větší citlivost vhodné k měření malých změn teploty a vzhledem k malým rozměrům jsou též vhodné pro bodové měření teploty. Jsou vyráběny v širokém rozsahu odporových hodnot (1 Ohm - 1 MOhm) pro teploty v rozmezí  $-80$  až  $200^\circ\text{C}$ . Nevýhodou termistorů je to, že nelze vyrobit termistory se stejnými charakteristikami a je nutno je jednotlivě kalibrovat.[9]

Termistory PTC (pozistory) se dnes vyrábějí nejčastěji technologií tlustých vrstev z feroelektrických keramických látek (např.  $\text{BaTiO}_3$ ) nebo použitím cermentových past na bázi uhlíku. Odpor pozistoru nejprve mírně klesá a při překročení Curieovy teploty poté prudce vzrůstá asi o 3 řády a pak opět mírně klesá. Oblast nárůstu je možné chemickým složením ovlivňovat a tak vytvořit např. sadu teploměrů s odstupňovaným teplotním rozsahem (nejčastěji po  $10^\circ\text{C}$ ).[10]

Kvůli své strmosti teplotní závislosti se pozistory používají i jako vratné tepelné pojistky. Další využití mají v odmagnetovacím obvodu barevných obrazovek, ve spínacích obvodech s polovodičovými prvky, čidlech teploty nebo ve dvoustavových snímačích v řídicích systémech (vinutí elektrických motorů, transformátorů, ohřev výkonových součástek apod.).[10]

### 2.1.5 Bezdotykové Teploměry

Veškerá hmota si vyměňuje se svým okolím tepelnou energii ve formě elektromagnetické radiace. Pokud je mezi hmotou a okolím teplotní rozdíl energie se bude přenášet ve směru tepla. Chladnější se bude ohřívat a teplejší ochlazovat. V případě, že teplota okolí bude shodná s teplotou předmětu, bude výměna energie nulová.

Přenosné bezdotykové teploměry nacházejí široké uplatnění při detekci tepelných ztrát a poruch, při kontrole potrubních systémů, nádrží apod. K měření rozložení teploty na povrchu objektů a k diagnostickým účelům se stále častěji využívají termokamery (termovizní kamery), které patří k nejmodernější termodiagnostické technice. Při bezdotykovém měření teploty se využívá zejména vyzařování infračerveného záření z měřeného objektu. Toto záření je optickým systémem soustředěno na vhodný detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován v elektronických obvodech a výstupem je pak údaj na displeji nebo termogram na monitoru vyhodnocovacího zařízení.

Pro bezdotykové měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 až 25  $\mu\text{m}$ . Uvedené rozsahy vlnových délek pokrývají měření teplot v rozmezí od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přístroje založené na měření teplotního záření umožňují měření v celém rozsahu teplot.[2]

## 2.2 Definice vlhkosti

Vlhkost je základní vlastnost vzduchu. Vlhkost vzduchu udává jaké množství vody v plynném stavu (vodní páry) obsahuje dané množství vzduchu. Množství vodní páry je časově velice proměnlivé a liší se také od místa k místu. Z pohledu meteorologie a klimatologie má množství vodních par zásadní význam, protože je na něm závislé počasí a místní podnebí. Při měření rozdělujeme vlhkost na několik jednotek a to na absolutní vlhkost, relativní vlhkost, měrná vlhkost, rosný bod. Pro měření vlhkosti plynů se používají specifické metody např. hygrometrická, která využívá dilatační vlhkoměry, gravimetrické vlhkoměry, odporové vlhkoměry, kapacitní vlhkoměry, vlhkoměry s vyhřívanými termistory. Další metoda psychometrická využívá stabilní psychrometry a aspirační psychrometry a další používané metody, jako metoda měření rosného bodu, metoda chromatografická, metoda spektrální a další. [4]

### 2.2.1 Absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost je poměr hmotnosti vodní páry ze vzorku okolního vzduchu ke hmotnosti suchého vzduchu v tomtéž vzorku. Absolutní vlhkost vzduchu (též hustota vodní páry nebo měrná hmotnost vodní páry) vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu s obvyklou jednotkou gram na krychlový metr ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Absolutní vlhkost vzduchu se vyjadřuje, jako  $m$  hmotnost vodní páry v daném objemu  $V$ . Jedná se tedy o měrnou hmotnost  $P_p$ . Obsah vodní páry ve vzduchu je

omezený. Vzduch se vodní párou nasytí a další vlhkost již nepřijímá. Konkrétní hodnota vlhkosti závisí především na teplotě a s rostoucí teplotou roste.[4][5]

Platí vztah:

$$\Phi = \frac{m}{V} [g \cdot m^{-3}]$$

### 2.2.2 Relativní vlhkost

Tento pojem vyjadřuje poměr mezi skutečným a maximálním možným nasycením vzduchu vodní parou. Jinak řečeno, je to procentní podíl nasycení suchého vzduchu vodní párou při konstantní teplotě. Pro lepší představu, suchý vzduch má relativní vlhkost 0 %, naopak relativní vlhkost nasyceného vzduchu je 100 %. Udává se v procentech [% RH].

Relativní vlhkost můžeme určit z parciálního tlaku vodní páry. Tlak vlhkého plynu můžeme rozdělit na parciální tlak vodní páry  $P_p$  může sloužit k určování vlhkosti.[4][5]

Platí vztah:

$$\varphi = \frac{P_p}{P_p''} = \frac{\Phi}{\Phi''} * 100 [\%]$$

$\varphi$  [%].....relativní vlhkost,

$P_p$  [Pa].....parciální tlak vodní páry,

$P_p''$  [Pa].....parciální tlak nasycené vodní páry,

$\Phi$  [ $g \cdot m^{-3}$ ].....absolutní vlhkost vzduchu,

$\Phi''$  [ $g \cdot m^{-3}$ ].....absolutní vlhkost nasyceného vzduchu.

Taktéž platí:

$$\varphi = \frac{P_c - P_p}{P_c - P_p''}$$

$P_c$  [Pa].....celkový tlak vodní páry a suchého vzduchu

### 2.2.3 Měrná vlhkost

Měrná vlhkost je množství hmotové vodní páry, která připadá na 1 kg suchého vzduchu, jedná se teda o vodní obsah. Vypočítává se hmotnostním zlomkem a jako poměr hmotnosti vodní páry  $m_p$  a hmotnosti suchého vzduchu  $m_v$ . Udává se v jednotkách [ $kg * kg^{-1}$ ]. Vzhledem k nízkým řádům se spíše používají jednotky  $g * kg^{-1}$ . Spolu s relativní vlhkostí je toto určení vlhkosti vzduchu ve vzduchotechnice nejběžnější.[4][5]

Platí vztah:

$$\chi = \frac{m_p}{m_v}$$

kde:



$\chi [kg * kg^{-1}]$ ..... měrná vlhkost,  
 $m_p [kg]$ .....hmotnost vodní páry,  
 $m_v [kg]$ .....hmotnost suchého vzduchu.

## 2.2.4 Rosný bod

Jak bylo řečeno, při poklesu teploty roste relativní vlhkost a vlhký vzduch může dosáhnout nasycení vodní párou. Z hlediska termodynamiky lze rozeznat proces, při němž ochlazování vlhkého vzduchu vede k jeho nasycení, a to proces izobarický. Typickým příkladem izobarického poklesu teploty vzduchu je ochlazování přízemní vrstvy atmosféry při radiačním poklesu teploty zemského povrchu. Důsledkem této teplotní změny je vznik rosy, mlhy nebo, v případě nasycení nad ledem, jinovatky.

Rosný bod (DP) je tedy teplota, tato teplota označuje hranici, kdy už vzduch není schopen přijímat jakékoli množství vodní páry. Jednotkou je Celsiův stupeň, popř. Kelvin. Při znalosti relativní vlhkosti a teploty lze rosný bod zjednodušeně vypočítat.[4][5]

$$\log EW = 0,66077 + 7,5\left(\frac{v}{237.3 + v} + \log_{10}(RH) - 2\right)$$

$$DP = \frac{237.3(0.6667 - \log EW)}{\log EW - 8.16077}$$

kde:

DP (°C).....rosný bod,  
 v (°C).....naměřená teplota,  
 RH (%).....relativní vlhkost,  
 EW.....hodnota mezi-výpočtu.

Podstata metody měření rosného bodu je určení teploty povrchu vody, při které se vykonává dynamická rovnováha mezi množstvím vody, která se vypařuje z tohoto povrchu a kvantem molekul vodní páry dopadajících na tento povrch z přilehlé vrstvy plynů. V rovnováze bude mít tuto teplotu vrstva plynu, která se přímo dotýká povrchu vody a relativní vlhkost této vrstvy bude 100%.[5]

### 3 Metody měření vlhkosti

Pro měření vlhkosti se využívá širokého spektra metod. Měření vlhkosti se provádí měřicími přístroji tzv. vlhkoměry. Vlhkoměry se vyvíjeli od jednoduchých až po dnešní analogové nebo číslicové přístroje. Principy určování vlhkosti vzduchu jsou založeny na fyzikálních nebo chemických zákonech. Nejčastěji se v praxi stanovuje vlhkost plynů (vzduchu). Metody uvedené dále se proto zabývají měřením vlhkosti vzduchu.[11][5]

#### 3.1 Psychrometrická metoda

Měření psychrometrickou metodou je zapotřebí soustavy dvou pokud možno identických teploměrů, jejichž čidla jsou umístěna co nejbližší vedle sebe (obvykle 3-5cm). Jeden teploměr co měří teplotu vzduchu bez ovlivňování uživatelem je tzv. suchý ( $T_S$ ) a druhý teploměr je obalen textilním povlakem, který je stále zvlhčován destilovanou vodou je to tzv. mokrý teploměr ( $T_V$ ). Jakmile se začne kapalina odpařovat z textilie, začne se odebírat výparné teplo ze rtuťového pouzdra, a tím odebírá teplo teploměru a hodnoty klesají až na bez adiabatického ochlazení. Platí pravidlo, pokud je okolní vzduch sušší, tím je ochlazování mokrého teploměru větší. Vzdušná vlhkost lze poté vypočítat z rozdílu teplot odečtených na obou teploměrech, vždy na mokrému teploměru je hodnota nižší nebo stejná, jako na suchém teploměru. Hodnota rozdílu teplot na obou teploměrech je dána intenzitou odpařování vody, která je ovlivněna vzdušnou vlhkostí, prouděním vzduchu a barometrickým tlakem vzduchu. Všechny tyto tři faktory musí být tedy při přesném psychrometrickém výpočtu zohledněny. Teplota na suchém teploměru je tedy vždy vyšší než teplota naměřená na teploměru vlhkém. Jedinou výjimkou v této situaci je stav, kdy se absolutní vlhkost vzduchu rovná vlhkosti maximální a relativní vlhkost vzduchu je tedy 100%, v tomto případě se již voda z mušelínové punčošky neodpařuje a nedochází k ochlazování čidla vlhkého teploměru – na obou teploměrech v tomto případě naměříme stejnou hodnotu teploty ( $T_S = T_V$ ). Nejznámějším zástupcem této metody je psychrometr Assmannův, který patří mezi aspirační. Je to přesný přístroj, který je v praxi dost rozšířen.[11][15]

Platí vztah:

$$e = E_V - A * p - (T_S - T_V)$$

kde:

$e$  (mmHg).....hledaný tlak par,

$E_V$ .....maximální tlak par při  $T_V$

$A$ .....konstanta (závisí na rychlosti proudění vzduchu)

$p$ .....barometrický tlak vzduchu

$T_S$ .....teplota suchého teploměru

$T_V$ .....teplota mokrého teploměru

## 3.2 Hygrometrická metoda

Tato metoda je založená na vlastnostech některých látek organického původu měnit svůj objem a tvar v závislosti od vlhkosti vzduchu (např. lidské vlasy jsou delší a uvolněnější, když jsou vlhké), proto daná látka je schopná absorbovat vzdušnou vlhkost a díky tomu měnit svoje vlastnosti. Také využívá sorpční děje (vznik tepla) na povrchu polovodičů tzv. vlhkost sorbovaná materiálem (pokud se změni vlhkost dané látky, změni se i její vlastnosti) může působit na objem, elektrický odpor, hmotnost, permitivitu. Nejstarší materiál používaný u této metody se používá odmaštěný lidský vlas. Používá se velké množství vlhkoměrů, které jsou založené na odlišných principech snímání a vyhodnocování, řadíme mezi ně gravimetrické vlhkoměry, dilatační vlhkoměry, odporové vlhkoměry, kapacitní vlhkoměry a vlhkoměry s vyhřívanými termistory. [11][5]

### 3.2.1 Gravimetrické vlhkoměry

Princip tohoto gravimetrického vlhkoměru je relativně jednoduchý. Vhodná látka absorbuje vodní páru ze známého objemu vzduchu, poté se určí rozlišenost hmotnosti látky, která absorbovala vzdušnou vlhkost a látky bez absorpce tzv. suché látky. Tento princip nám určuje rozdíl hmotnosti vodních par obsažených ve vzduchu. Toto měření velice zdlouhavé a nákladné, a proto se měření používá spíše v laboratorních podmínkách pro ověřování a kalibraci přístrojů.[11][5]

### 3.2.2 Dilatační vlhkoměry

Historicky nejstarší metoda měření vlhkosti vzduchu, kde hlavním představitelem je vlasový vlhkoměr. K mechanismu je upevněn lidský odmaštěný vlas, který pohybuje s ručičkou po stupnici. Při změně relativní vlhkosti z 0% na 100%, změni svou délku o 2,5 % až 3 %. Přesnost tedy dosahuje kolem 3 %. Prodloužení však není přímo úměrné relativní vlhkosti, protože polovina celkového prodloužení je dosažena přibližně již při vlhkosti 30 %. Významnou roli při použití organických vlhkoměrných látek hraje degenerativní faktor stárnutí a tedy i změna jejich vlastností. Po určitém čase je zde nutnost regenerace. Dilatační hygrometry jsou vhodné pouze pro orientační měření vlhkosti. Jsou to zejména přístroje s vysokou tolerancí a sloužící pro účely záznamového měření.[11][5]

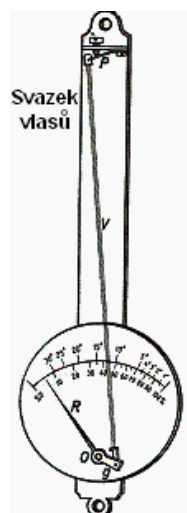
K vlasovému hygrometru patří vztah:

$$\lambda = k * T * \log \varphi$$

T (K).....absolutní teplota

k.....hygrometrická konstanta

$\varphi$  (%).....relativní vlhkost

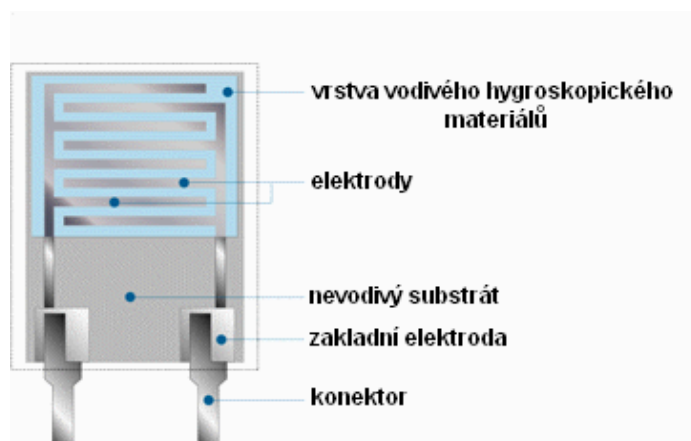


Obr. 1 - Vlasový hygrometr. Převzato z [12]

### 3.2.3 Odporové vlhkoměry

Tyto vlhkoměry jsou založeny na principu změny elektrického odporu určitého sorpčního materiálu na základě množství sorbované vody. Jako základní sorpční materiály se používají solné roztoky (iontové soli), polymery apod. jednoduše řečeno elektrolyt v pevné nebo kapalně formě. Senzor používá změnu elektronické vodivosti, která se mění při obsahu vody v materiálu, většinou mývá tvar destičky osazená elektrodami. Destička, která je vyrobená z keramiky (nevodivý materiál), kde na její povrch této destičky je nanesená vrstva roztoku iontové soli (vodivá hygroskopická látka) a tím dochází ke změně vodivosti materiálů a určení relativní vlhkosti vzduchu. Aby se předešlo polarizaci elektrod, je nutné měřit střídavým napětím.

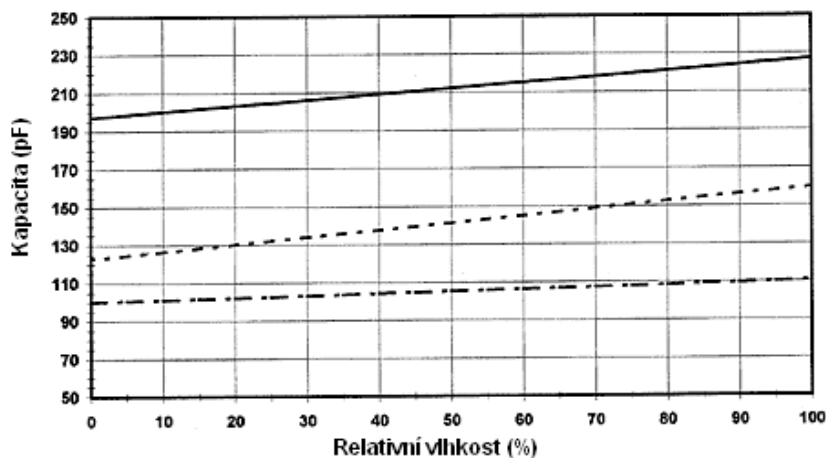
Velikost odporu materiálu není jen závislá na relativní vlhkosti, ale také i na teplotě, a proto musí být sledovaná i teplota materiálu a být teplotně stabilizovaná. Závislost elektrického odporu na vlhkosti (za konstantní teploty) není lineární. Pokud použijeme různé koncentrace lithné soli nebo různých materiálů, lze pokryt celý rozsah materiálu, jelikož změna elektrické vodivosti pokrývá jen třetinu až pětinu celkového rozsahu. (od 0 % až do 100%). Tento senzor nelze použít při vyšších teplotách (-40 °C až 100 °C) a je citlivý na orosení, ale přesto má velké využití díky jeho velké přesnosti až na desetiny %RH a stability.[11][5]



Obr. 2 - Odporový hygrometr. Upraveno a převzato z [13]

### 3.2.4 Kapacitní teploměry

Kapacitní vlhkoměry mají poměrně blízko svým složením k odporovým vlhkoměrům. Mění se jeho elektrický odpor a kapacita při sorpci a desorpci vlhkosti materiálem tím pádem také impedance. Prakticky je to kondenzátor, jehož dielektrikum tvoří tenká vrstvička materiálu vratně sorbující vlhkost z prostředí. Jedna z elektrod je porézní (děrovaná), která umožňuje kontakt z okolního vzduchu s dielektrickým filmem. Množství absorbované vody je relativně malé, ale pomocí velké dielektrické konstanty jsou změny kapacity měřitelné, řádově 0,1 % z celkové kapacity na každé %RH.[5]



Obr. 3 - Závislost kapacity čidla na relativní vlhkost vzduchu. Převzato z [5]

Kapacitní senzory mají dobrou odolnost vůči kondenzaci, malou závislostí na údaje na teplotě, malými rozměry, relativně malou odezvou v řadu desítek sekund s přesností v jednotkách %RH, a také dobrou odolností proti chemikáliím i vyšším teplotám.[5]

Pro převod kapacity na relativní vlhkost vzduchu platí vztah:

$$k = 1 + \frac{211}{T} \left( P + \frac{48P_s}{T} H \right) * 10^{-6}$$

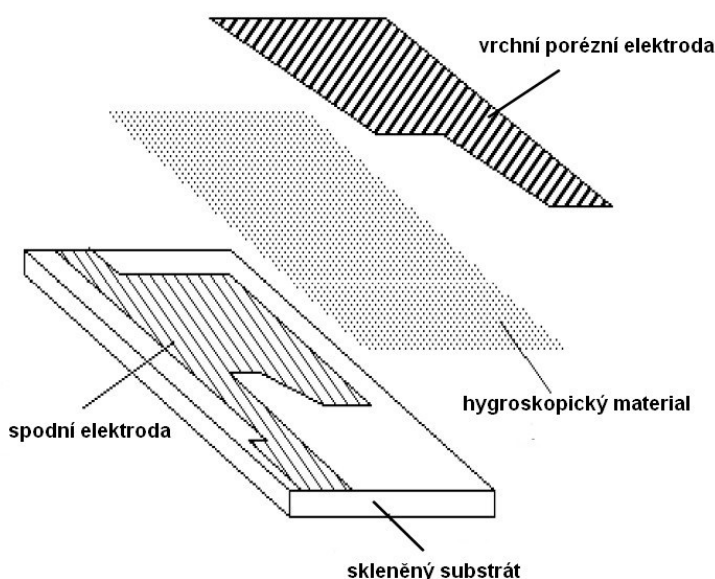
$k$ .....dielektrická konstanta

$T$ .....absolutní teplota v Kelvinech

$P$ .....tlak měřeného vzduchu

$P_s$ .....tlak vzduchu nasyceného vodní parou při teplotě  $T$

$H$ .....relativní vlhkost



Obr. 4 - Kapacitní vlhkoměr. Upraveno a převzato z [14]

### 3.2.5 Vlhkoměry s vyhříváním termistory

Tyto vlhkoměry využívají princip závislosti tepelné vodivosti vzduchu na jeho vlhkosti. Složení tohoto senzoru je, že obsahuje dva stejné termistory, kde jeden je hermetický uzavřen v suchém dusíku a druhý je přístupný okolnímu prostředí. Jedna větev můstku obsahuje termistory, které jsou zapojené do série. Druhá větev je osazena pevnými rezistory a nulovacím trimrem. Pokud proud prochází termistory, tak se zahřívají a jejich teplota závisí na její ochlazení vzduchem tj. na tepelné vodivosti plynů. Pokud je v suchém prostředí, tak se můstek vynuluje. Pokud v suchém prostředí není a je přítomnost vodní páry, vlhkost ho rozváží. Hlavní výhodou těchto vlhkoměrů je, že mají velkou odolnost vůči vysokým teplotám (až 200 °C) a vysokou chemickou odolnost.[5][11]

## 4 Měřicí modul Sensirion EK-H5

Modul od společnosti Sensirion označen jako EK-H5 je měřicí zařízení, které po připojení senzoru (čipu) SHT21 dokáže snímat teplotu a vlhkost okolního prostředí.

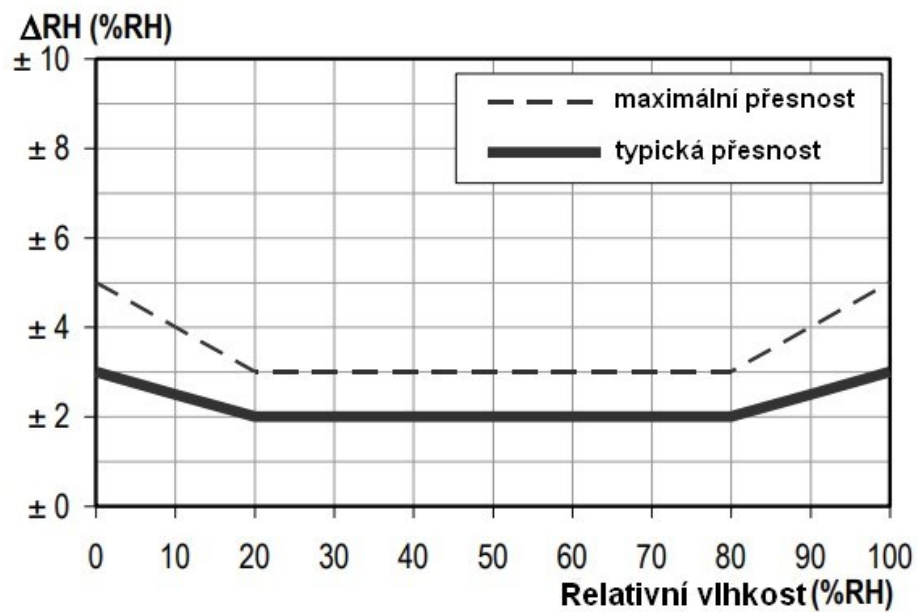
Na obrázku (Obr. 2) lze vidět kompletní měřicí zařízení, které se skládá z USB klíče, který je připojen na kabel s konektorem na připojení senzoru, a také ze senzoru pro měření teploty a vlhkosti prostředí. Výrobce uvádí, že k modulu EK-H5 lze připojit několik čipů k měření, my máme dostupný senzor s typovým označením SHT21, který je součástí kitu.



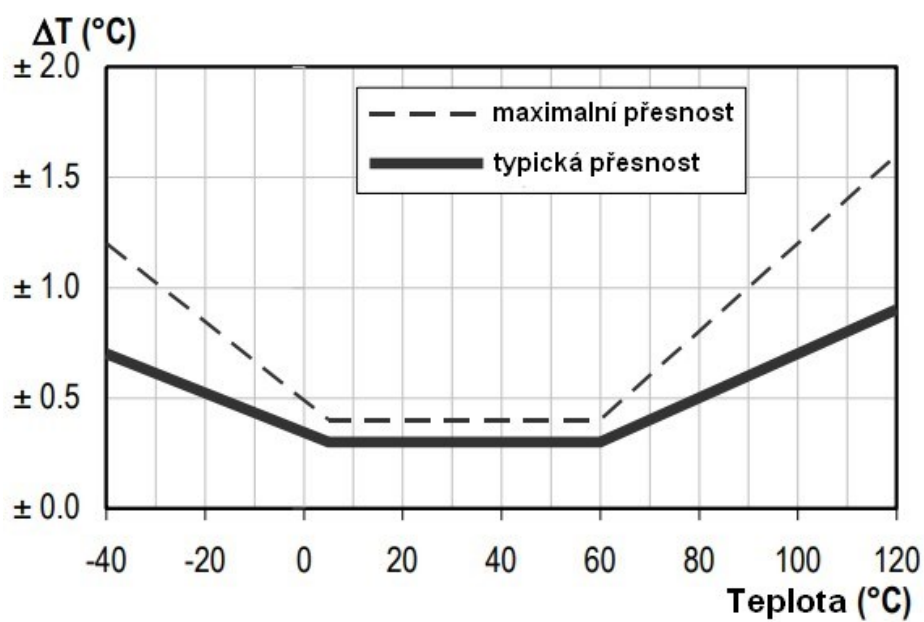
Obr. 5 - Modul Sensirion EK-H. Převzato a upraveno z [7]

### 4.1 Senzor SHT21

Senzor SHT21 je založen na principu kapacitního typu snímače vlhkosti, snímače teploty, zesilovače, převodníku A/D a paměti. Senzor se tak skládá z kondenzátoru, kde dielektrikum je polymer, který absorbuje nebo vypouští vodu úměrně k hodnotě relativní vlhkosti okolního prostředí, čímž se mění jeho kapacita. Ta je následně elektronicky měřená. Protože změna kapacity je úměrná změně vlhkosti, vlastně ji tím měříme. Toto zařízení poskytuje specializovaný analogový, digitální a integrovaný obvod ve formátu signálu IC2. Toto nabízí vynikající výkonnost snímače ve smyslu přesnosti a stability, stejně jako minimální spotřeby energie. Senzor je umístěn v pouzdře DNF, který obsahuje 6 vývodů o velikosti 3x3 mm. Vývody jsou umístěny naproti sobě po třech, a také jedním termálním pádem, který slouží k odvodu tepla. Celý tento senzor, který je vyroben s křemíku, je umístěn v obalu, který ho mechanicky chrání a skládá se ze samotného senzoru relativní vlhkosti vzduchu.[11]



Obr. 6 - Přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu senzoru SHT21. Převzato a upraveno z [8]



Obr. 7 - Přesnost měření teploty vzduchu senzoru SHT21. Převzato a upraveno z [8]

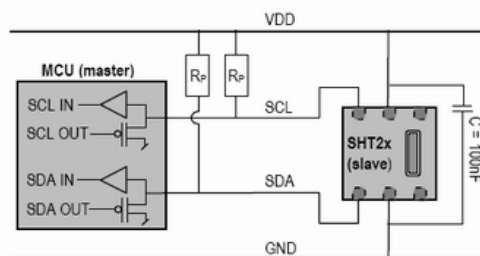


**Tabulka 1 - Specifikace senzoru SHT21**

SHT21	
Rozsah měření vlhkosti:	0% ~ 100% RH
Rozsah měření teploty:	-40 °C ~ 125°C
Spotřeba energie:	0.15 $\mu$ A
Rozhraní:	I2C
Přesnost teploty:	$\pm 0,3$ °C
Přesnost vlhkosti	$\pm 2$ %RH
Pracovní napětí:	1,5 V ~ 3,6 V DC
Reakční doba:	6 až 8 sekund
Napájecí napětí:	2,1 - 3,6 V
Pouzdro:	DFN
Rozměry:	3x3 mm

Doba odezvy relativní vlhkosti je 8s. Typická chyba měření relativní vlhkosti vzduchu je  $\pm 2$  % při standartních teplotách, kdy rozsah provozní relativní vlhkosti je od 0 % RH do 100 % RH. Doba teplotní odezvy se pohybuje okolo 5 až 30 sekund. U teploty vzniká chyba měření přesnosti  $\pm 0,3$  °C, kdy provozní rozsah teploty je od -40 °C do 125 °C (to je prakticky fyzikální maximum použitelnosti křemíkových integrovaných obvodů). Změny napětí na senzorech jsou v řádku mikrovoltů a pro zpracování je potřebné je zesílit tak, aby se maximální hodnota ideálně rovnala napájecímu napětí.

Rozlišení senzoru je dáno A/D převodem, který je v případě vlhkosti 12bitový a v případě teploty 14bitový tzv. referenční napětí, což je zde polovina napájecího napětí 1,8 V, lze rozdělit na 256 dílků (8bitů) resp. na 4096 dílku (12bitů). Pomocí I2C komunikace a lze nastavením registru měnit rozlišení, volit v rozsahu 8 až 12 bitů u vlhkosti a 12 až 14 bitů u teploty z čehož jde vyčíst, že jemnější 12 bitový převod taky trvá 16x déle než hrubý 8 bitový, v mém případě je nastaven převodník na maximální jemnost, tedy 12 bitu u vlhkosti a 14 bitů u teploty, aby měření bylo přesnější. Převodní charakteristika je v obou případech samozřejmě lineární a její strmost lze v rámci změny nastavení vnitřních registrů senzoru prostřednictvím sériovou komunikace měnit a tím přizpůsobit.

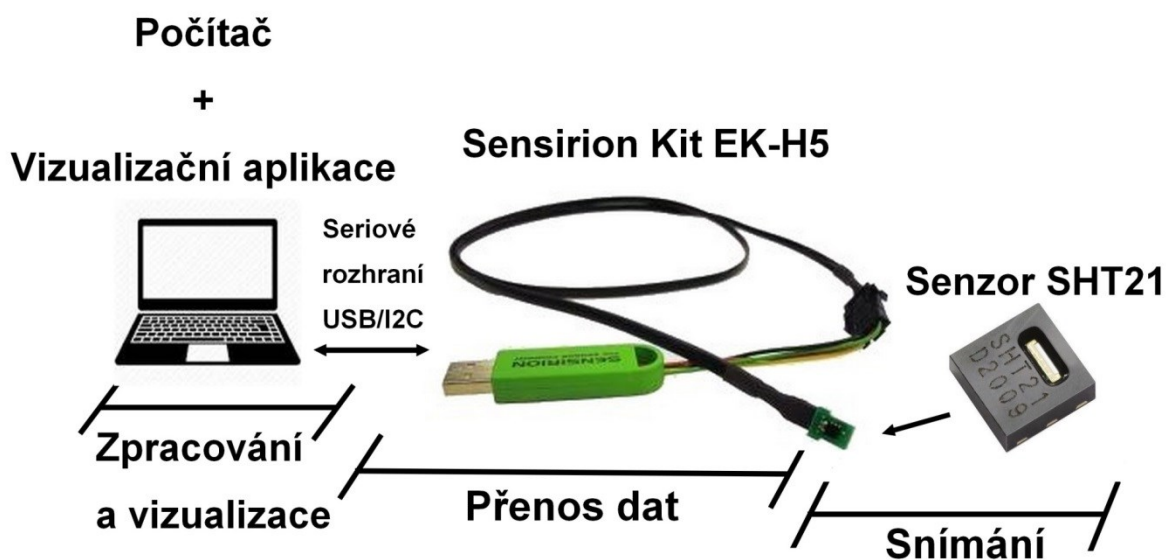


*Obr. 8 - Výstup senzoru SHT 21 - komunikace I2C. Převzato z [8]*

## 5 Návrh a realizace vizualizační aplikace

Při samotné realizaci aplikace byly potřebné dodané komponenty, jakož je USB klíč pro zapojení do PC, kabel s konektory, sensor pro měření vlhkosti a teploty typu SHT21, počítač, programy pro konstrukci aplikace a určité důležité knihovny pro synchronizaci senzoru s komunikačním rozhraním a vývojovým prostředím.

Hlavní prioritou bylo vytvoření aplikace, která nám umožňuje vzájemnou komunikaci mezi počítačem a modulem Sensirion EK-H5, a také přenos informací do vytvořené aplikace, jejich zaznamenávání v reálném čase, zobrazení přesných naměřených hodnot, výpočet hodnot, grafické vizualizace hodnot v reálném čase, zpracování hodnot a uložení do paměti pro další analýzy a vyhodnocování. V našem případě dochází k měření vlhkosti s přesností 1 % RH, měření teploty s přesností 0,1 °C a výpočtem rosného bodu v reálném čase z teploty a relativní vlhkosti.



Obr. 9 - Zapojení systému pro měření vlhkosti a teploty pomocí senzoru SHT21

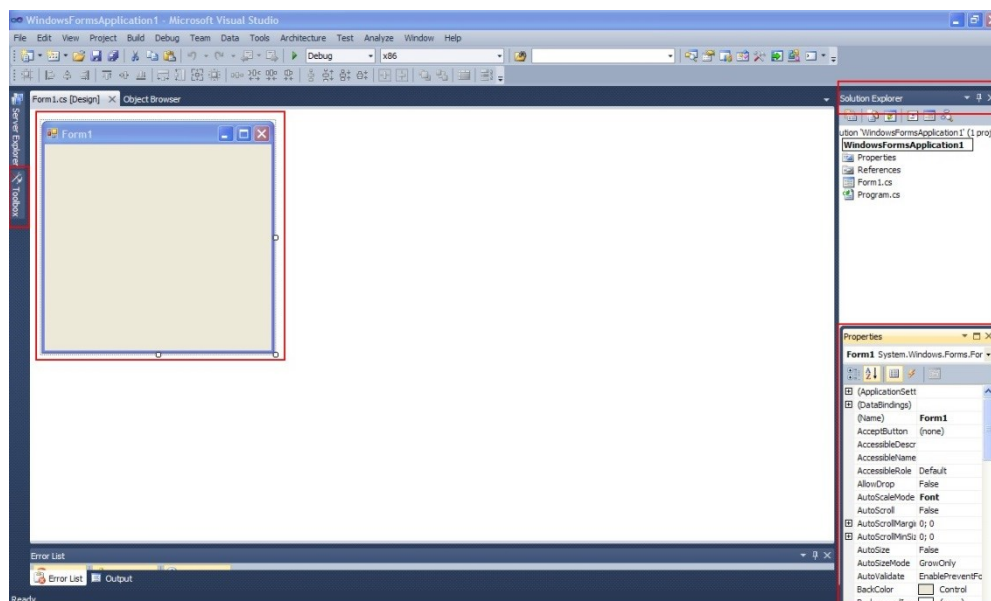
## 5.1 Vizualizační prostředí Visual Studio – Windows Forms Application

Aplikace pro zařízení Sensirion EK-H5 je vytvořena v textovém editoru Visual Studio 2017 Community, která je volně ke stažení od společnosti Microsoft. Windows Forms je chytrá klientská komponenta z .NET Framework, jedná se o sadu upravovatelných knihoven, které umožňují provádění běžných aplikačních úloh, jako je například čtení a zápis do systémových souborů. Při použití vývojového prostředí, jako je například Visual Studio, můžete vytvořit aplikaci modelu Windows Forms, které zobrazují informace, žádají vstup od uživatele a komunikují se vzdálenými počítači prostřednictvím sítě.

Formulář v modelu Windows Forms, je vizuální povrch na kterém je možné zobrazit informace pro uživatele. Obvykle vytváříte aplikaci modelu Windows Forms umístováním ovládacích prvků na formuláře a vývojem odpovědi na uživatelské akce, jako je například kliknutí myši nebo stisknutí klávesy. *Ovládací element* je abstraktní element uživatelského rozhraní (UI), který zobrazuje data nebo přijímá uživatelský vstup.

Model Windows Forms obsahuje různé ovládací prvky, které můžete umístit na formulářích: ovládací prvky, které zobrazí textových polí, tlačítek, rozevírací seznamy, přepínací tlačítka a i web stránky. Pokud existující ovládací prvek nevyhovuje vašim potřebám, Windows Forms model podporuje vytváření vlastních ovládacích prvků pomocí třídy UserControl.

Model Windows Forms má bohaté ovládací prvky uživatelského rozhraní, které emulují funkce v špičkových aplikacích, jako je třeba Microsoft Office. Pomocí ovládacích prvků ToolStrip a MenuStrip, můžeme vytvořit panely nástrojů a nabídky, které obsahují texty, obrázky, zobrazují pod nabídky anebo jsou hostitelé jiných ovládacích prvků, jako například textových polí a polí se seznamem, jak můžeme vidět na obrázku 10.[16]



Obr. 10 - Windows forms Aplikace

Panel nabídek (menu bar) u horního kraje obrazovky zajišťuje přístup k různým částem prostředí, které jsem při psaní programu používal. K nabídkám a jejich příkazům se dostaneme pomocí klávesnice nebo myši stejným způsobem, jako u všech programů pro systém *Windows*. *Panel* nástrojů (Toolbox) je umístěn pod panelem nabídek a jsou na něm tlačítka pro rychlé provádění nejčastějších používaných příkazů, které můžeme na formulář vložit. Okno *Solution Explorer* (průzkumník řešení – na pravé straně dialogového okna) zobrazuje kromě dalších položek názvy souborů spojených s otevřeným projektem. *Propertis* (vlastnosti) vidíme vlastnosti aktuálně označeného prvku na formuláři. *Designer* (Grafický návrhář) zde vidíme, jak formulář vypadá.[17][16]

## 5.2 I2C

Sběrnice I2C (I2C-bus, Inter-IC-bus) zprostředkovává datovou komunikaci mezi jednotlivými integrovanými obvody většinou v rámci jednoho zařízení. Mohou být připojeny všechny integrované obvody, které zvládají speciální protokol sběrnice. Mimo integrovaných obvodů RAM, EEPROM, obvodů pro rozšíření portů, A/D a D/A převodníků a obvodů hodinových signálů existuje ještě celá řada speciálních integrovaných obvodů. Sběrnice I2C používá sériovou datovou linku SDA a linku hodinového signálu SCL. Data a adresy se přenášejí podobně jako v posuvných registrech společně hodinovými impulsy. Obě linky je možno používat jako obousměrné. Přenosovou rychlost sběrnice určuje vodič SCL. Přenosová rychlost sběrnice je pro většinu aplikací dostatečná i v základní verzi, kde je frekvence hodin 100kHz. Ve vylepšených verzích to může být 400kHz nebo 1MHz, ale ne všechny integrované obvody tuto verzi podporují.[18]

## 5.3 Komunikace se zařízením

Jak již bylo řečeno, kit se skládá ze dvou částí, samotného senzoru SHT21 od výrobce Sensirion a USB/I2C převodníku IO-Warrior, který jim dodává, Code Mercenaries. Výrobci (nejen) senzorů víceméně počítají, že senzory budou připojené na nějaké autonomní zařízení, zpravidla je to nějaký malý mikrokontrolér, který má některé rozhraní např. I2C, SimpliCI, SPI, 1WIRE, ne přímo na počítač, jelikož dnešní počítače používají prakticky jedinou sériovou linku a to je USB, ale senzor SHT21 komunikuje přes I2C, proto byl potřeba nějaký mezičlánek (převodník), který tyto dvě různé technologie spojí. S převodníkem je potřeba komunikovat na základě předem definovaných příkazů, které se většinou sdružují do funkcí. Tyto příkazy a funkce jakožto i další komponenty potřebné pro správnou funkci převodníku jsou definovány v souboru, kterému se říká knihovna. Tohoto spojení využila firma Code Mercenaries, která toto zařízení vyvinula s názvem IO-Warrior a kromě I2C dokáže komunikovat i s dalším rozhraním jako je SPI, USART apod.

### 5.3.1 Knihovna IO-Warrior

Knihovna (anglicky library) je v informatice označení pro souhrn procedur a funkcí, často také konstant a datových typů (v objektovém programování též tříd, objektů a zdrojů), který může být využíván více počítačovými programy. Knihovny usnadňují programátorovi tvorbu aplikací tím, že umožňují využití hotového kódu, použití jednou vytvořeného kódu v jiných programech; při týmové

práci mohou sloužit k dělbě práce. Knihovna poskytuje své služby navenek pomocí API (aplikační rozhraní), které zahrnuje názvy funkcí, předávané parametry a návratové hodnoty.

Podle způsobu spojení s programem, který je používá, lze knihovny rozdělit na statické a dynamické. V našem programu je použita dynamická knihovna (ty mají příponu .dll).

V podstatě to funguje tak, že počítač pošle převodníku zprávu: „řekni čidlu, ať změří hodnoty a počkej, až ti je pošle a pak je pošli mně zpět“, aby se tento převodník dal používat, musí výrobce dát k dispozici funkce, které to umí, jejich seznam a popis, jak formulovat jednotlivé příkazy a jak zpracovat jednotlivé data. Všechny tyto data jsou obsažené a zabalené v knihovně „dll“, konkrétně se jedná o knihovnu iowkit.dll, která je umístěna v projektu. Aby s daty mohl program pracovat, je mu potřeba říct, jak se jmenuje a kde ho najde a to pro všechny funkce, které potřebujeme je uloženo v projektu v souboru iowkit.cs, který dodává pomůcku výrobce v SDK (software development kit) a pokud budeme chtít např. vlhkost, napíšeme **ReadSHT21(CONST\_HUM)**; a prakticky nás dál nic nezajímá co a jak se děje, jelikož tyto řádky kódu napsal výrobce.

Programátorovi stačí znát jen jméno funkce, a jaké parametry jí zadat, aby ji mohl používat, stačí mu tedy v programu napsat jeden jediný příkaz, aby získal třeba hodnotu teploty z čidla, samotná funkce totiž může být značně složitá, obsahovat volání dalších funkcí a její vývoj a odladění chyb mnohdy trvá delší dobu a toho všeho je uživatel hotové knihovny ušetřen. Další věc je, že výrobce nějakého zařízení (jako v případě tohoto převodníku) tím zajistí, že jeho výrobek bude používán vždy správně do samotné knihovny iowkit.dll nelze totiž nijak zasahovat. Příklad funkce otevírající komunikaci počítače s převodníkem:

[code]

```
[DllImport(dllName: @"..\knihovny\iowkit", SetLastError = true)] //umístění
public static extern IntPtr lowKitOpen //název
```

[/code]

### 5.3.2 SDK (software development kit)

U větších výrobců senzoru poskytují výrobci SDK (software development kit), je to prakticky pomůcka pro vývojáře obsahuje všechny nezbytné soubory pro práci se zařízením - většinou potřebné knihovny v našem případě hlavně knihovnu iowkit.dll a příklady použití, je volně ke stažení na oficiálních stránkách výrobce senzoru (Codemercs). V našem případě SDK software obsahuje použití pro senzor Sensirion pro měření teploty a vlhkosti, sice pro jiný typ modelu, ale modifikací požadavků na čtení dat záměnou parametrů podle datasheetu pro senzor SHT21 dojde ke komunikaci s počítačem a zařízením.

Pro přiblížení, jak program IO-Warrior komunikuje s rozhraním I2C je uveden zlomek řádku kódu, jak bylo postupováno, jelikož je to prioritní věc, aby mohlo dojít k vytvoření aplikace a vůbec ke spojení se zařízením (detailní vysvětlení kódu je přiloženo v příloze).

Init I2C Mode - naplní zprávu pro převodník IO-Warrior hodnotami pro inicializaci provozu v I2C módu, jak již bylo psáno, umí jich víc, a tak se mu musí říct, který použít.

```
report[0] = 0x01; //I2C Mode udává, že se jedná o příkazy, dotazy, nastavení
                určené pro samotný Io-warrior (nastavení komunikace Iowarrior)
```

```
report[1] = 0x01; //Enable
report[2] = 0xC1; // změna proti použitému příkladu - původně bylo 0x40
```

Init SHT21 measurement (soft reset) - inicializuje (nastartuje) samotné čidlo:

```
report[0] = 0x02; //příkaz pro IO-Warrior nastavení I2C komunikace
report[1] = 0xC2; //příkaz pro IO-Warrior nastavení I2C komunikace
report[2] = 0x80; //adresa čidla - všechny mají stejnou
report[3] = 0xFE; //příkaz pro reset čidla změna proti použitému příkladu,
                    původně bylo 0x1E hodnota je uvedena v datasheetu v tabulce na
                    str. 8
```

Kód čtení a zápisu I2C:

```
//Read from I2C-Device
public double ReadSHT21(byte cmd)
{
    byte[] report = new byte[9]; //report data-sem se vkládají data, které se
                                mají poslat do IO-warrior

    uint ret;

    report[0] = 0x03; //příkaz pro IO-Warrior - pošli data do čidla
    report[1] = 0x03; //počet bajtů, které má očekávat při odpovědi od čidla -
                    jsou 3 v jednom je adresa a v dalších dvou naměřená
                    hodnota
    report[2] = cmd; //příkaz - co má čidlo poslat 0xF3 je pro teplotu a 0xF5
                    je pro vlhkost

    ret =
    IOWarrior.Functions.IowKitWrite(m_ioHandle, IOWarrior.Defines.IOW_PIPE_SPECIAL_MODE
    , report, IOWarrior.Defines.IOWKIT_SPECIAL_REPORT_SIZE); //zapiše ( IowKitWrite
    )data z report do převodníku IO-Warrior - ten pošle dál dva bajty adresu a příkaz
    pro čidlo

    ret = IOWarrior.Functions.IowKitRead(m_ioHandle,
    IOWarrior.Defines.IOW_PIPE_SPECIAL_MODE, report,
    IOWarrior.Defines.IOWKIT_SPECIAL_REPORT_SIZE); //přečte ( IowKitRead) přijatá
    data z převodníku a uloží do report - výsledek měření, který mezitím poslalo čidlo

    return ((report[2] << 8) | report[3]); }
```

Tyto řádky kódu jsou obsaženy v SDK software IO-Warrior (cesta souboru: IO-Warrior\_SDK\_win\SDK 2017\Windows\samples\I2C\C#\Humidity Sensirion SHT75), které byly upravené na konkrétní typ senzoru v našem případě SHT21, podle obsaženého datasheetu na straně 8. Tyto funkce jsou s 95 % převzaté z příkladu "Humidity Sensirion SHT75" v SDK ze souboru Form1.cs, prakticky nemá cenu psát vlastní kód pro komunikaci, který by nakonec, aby byl funkční, musel vypadat úplně stejně.

Příkazy pro čtení hodnot čidla SHT21 jsou v datasheetu od výrobce psané v binárním kódu (dvojková soustava), aby mohlo dojít ke zpracování čtení a zápisu dat, je třeba tento binární kód převést do hexadecimální (šestnáctkové) soustavy.

Pro vlhkost:     public const byte CONST\_HUM = 0x0F5;     //záměna za 0x05  
Pro teplotu:     public const byte CONST\_TEMP = 0x0F3;     //záměna za 0x03

Command	Comment	Code
Trigger T measurement	hold master	1110'0011
Trigger RH measurement	hold master	1110'0101
Trigger T measurement	no hold master	1111'0011
Trigger RH measurement	no hold master	1111'0101
Write user register		1110'0110
Read user register		1110'0111
Soft reset		1111'1110

Obr. 11 - Základní sada příkazu ve dvojkové soustavě. Převzato z [8]

Hold master znamená, že I2C linku blokuje během určitého měření, na lince může být teoreticky kolem 128 I2C součástek, kterým by mohl nějaký nadřazený systém posílat zprávy i během doby, kdy čidlo měří a počítá hodnoty, prakticky by to mohlo měření nějakým způsobem ovlivnit, jelikož se musí zabývat příjmem zprávy (i když to nepatří čidlu, bude se zabývat všemi a jen když zjistí, že je pro něj, tak ji dál zpracuje), proto je v zařízení možnost blokování linky, do doby než odešle výsledek.

Konkrétně pro zařízení Sensirion EK-H5 nikdy na lince nebude víc než jedna součástka, tak že prakticky by bylo jedno, jestli se použijí příkazy pro no hold master nebo hold master. Do projektu byl vybrán hold master po převodu do šestnáctkové soustavy, že blokovat linku nemá, protože to není potřeba.

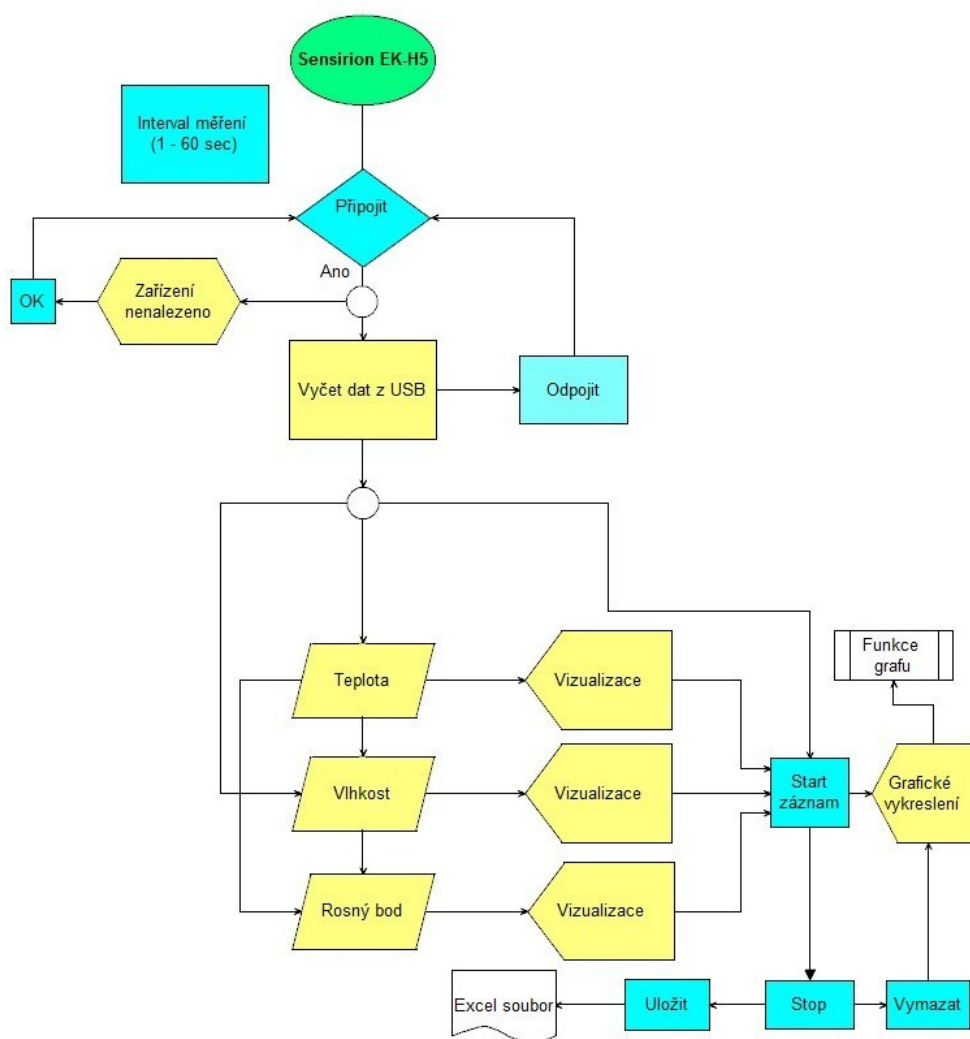
### 5.3.3 Přenosová rychlost

Rychlost čtení hodnot ze senzoru je obsaženo v datasheetu senzoru SHT21, jelikož využíváme přesnost rozlišení u vlhkosti 12 bitů a teploty 14 bitů, tak je pro vlhkost typicky 22 ms a maximálně 29 ms a pro teplotu je to typicky 66 ms a maximálně 85 ms. Pokud budeme počítat i s časem na přenos dat, tak čtení s čidla by mohlo odpovídat maximálně každých 100 ms, pokud by se použila nejmenší přesnost, tak pro vlhkost by byla rychlost 4 ms a pro teplotu 11 ms, to by odpovídalo 20 ms maximální hodnoty čtení dat ze senzoru.

Jak už vyplývá z názvu této bakalářské práce, byla preferována přesnost měření, před rychlostí. Maximální frekvence tedy odpovídá 100 ms, ale pro naše měření je nepoužitelná, jelikož by se tato rychlost hodila na nějaké kratší měření v řádu jednotek minut (kvůli nárokům na paměť pro uložení dat), vzhledem k tomu, že čidlo má delší dobu reakce, tak v naší aplikaci je možnost změny intervalu měření od 1 sekundy do 60 sekund podle toho, v jakém intervalu chceme měřit. Senzor je svou povahou konstruovaný pro prostředí, kde se podmínky mění pozvolna.

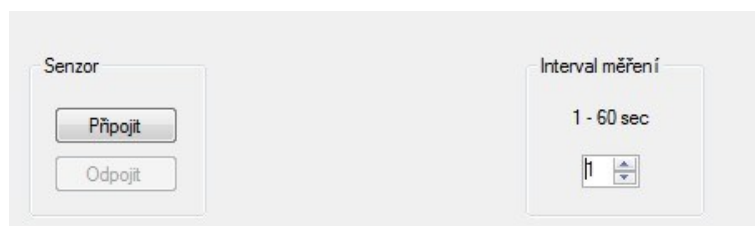
## 5.4 Výsledná realizace a popis jejich části

Při samotné realizaci aplikace, byly použity dva pluginy, jelikož visual studio nám poskytne základní komponenty, za kterých lze složit program, ale ne všechny, i když podporuje fyzicky vytvoření grafu, ale za předpokladu vytvoření nějakého statického grafu, kde podpora Microsoftu není zrovna dostačující tzv. vytvořit z toho „živý graf“ je velice časově náročné a zabralo by to více času, jak samotné vytvoření celého programu. Proto vyvinuli doplňkový modul „plugin“ jiné aplikace, která rozšiřuje její funkčnost. K vytváření excelového souboru, byl použit plugin ClosedXML, který je volně ke stažení na oficiálních stránkách. Pro vytvoření grafu byl použit plugin Zedgraph, který je také volně ke stažení s popisem určitých příkazů pro vykreslování.



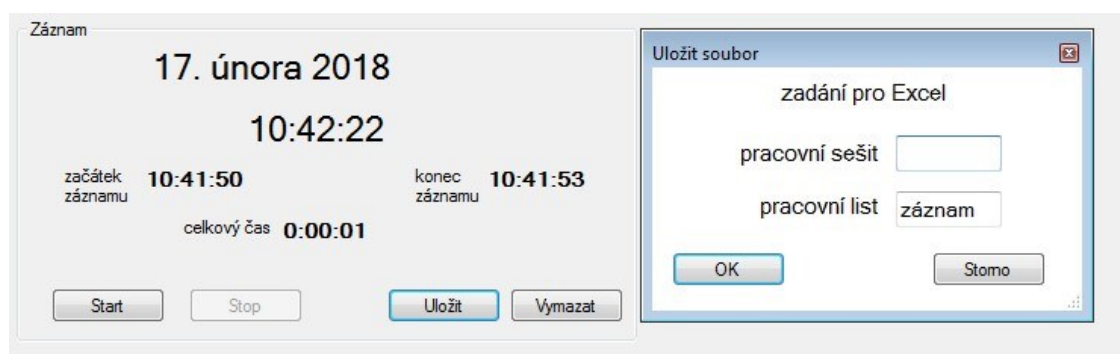
Obr. 12 - Vývojový diagram aplikace





*Obr. 13 - Připojení senzoru*

Kliknutím na tlačítko „Připojit“, připojíme tak senzor (modul) k aplikaci, program rozpozná ve kterém portu je připojen a pokud dojde k připojení v horní části programu u nápisu „zařízení“ se objeví připojený modul, jeho název a sériové číslo. Zároveň zobrazí měřené a vypočtené hodnoty, kde si můžeme nastavit interval měření od 1 do 60 sekund. Pokud program nenalezne žádný připojený senzor, tak vyskočí hláška „Zařízení nebylo nalezeno“. Příkazy pro připojení a komunikaci jsou vysvětleny v bodu 5.3, jelikož vyhledávání senzoru má na starost funkce z originál knihovny „IO-warrior“.



*Obr. 14 - Záznam dat a uložení*

Dalším krokem je samotný záznam dat, v poli „záznamu“ jsou časové údaje, jako je aktuální čas a datum, čas začátku záznamu, čas konce záznamu, celková doba trvání záznamu. Kliknutím na tlačítko „start“ v poli „záznam“ se spustí ukládání naměřených hodnot do paměti a zároveň k zobrazování na grafech. Záznam se ukončí po kliknutí na tlačítko „Stop“, poté nastanou dvě možnosti, buď tlačítkem „vymazat“ se vymažou naměřené hodnoty z paměti a vyčistí se grafy, anebo tlačítkem „uložit“ se otevře okno (obr. 13) pro pojmenování pracovního sešitu a pracovního listu excelového souboru a kliknutím na tlačítko „ok“ se soubor uloží do adresáře dokumenty/SENSIRION záznamy měření a do složky jejíž název je aktuální datum, které program vytváří automaticky.

	minimum	čas	maximum	čas	průměr
teplota	20,2	13:26:47	22,5	13:26:47	21,4
vlhkost	31,0	13:26:47	38,0	13:26:47	32,7
rosný bod	03,6	13:26:47	05,9	13:26:47	04,3

čas	teplota	vlhkost	rosný bod
10:41:51	20,3	34,0	03,7
10:41:52	20,3	34,0	03,7
10:41:53	20,3	34,0	03,7
11:03:55	20,3	33,0	03,7
11:03:56	20,3	33,0	03,7
11:03:57	20,3	33,0	03,7
11:03:58	20,3	33,0	03,7
11:03:59	20,3	33,0	03,7
11:04:00	20,3	33,0	03,7
11:04:01	20,3	33,0	03,7
11:04:02	20,3	34,0	03,7

Obr. 15 - Vytvoření excel souboru

V excelovém souboru se uloží všechny naměřené hodnoty v určitém časovém úseku, kdy jsme zařízení nechali snímat hodnoty okolního prostředí. Hodnoty se ukládají každou sekundu, a také do souboru uloží maximální, minimální a průměrnou hodnotu za celkovou dobu měření. Tyto data poté lze využít pro další zpracování a vizualizaci.

Část kódu:

```
private void CreateExcel()
{
    try
    {
        //vytvori slozku pro zaznamy mereni - nazev je aktualni den
        FolderPath = Path.Combine(DirectoryPath,
            DateTime.Now.ToShortDateString());
        if (!Directory.Exists(FolderPath))
            Directory.CreateDirectory(FolderPath);
        //vytvori excelovy soubor se jmenem zadany po kliknuti na tl.
        "Ulozit"
        string path = Path.Combine(FolderPath, workbookName + ".xlsx");

        //vytvori excelovy pracovni list
        var worksheet = workbook.Worksheets.Add(workSheetName);
        //rada2 - naplneni bunek
        var rowFromWorksheet = worksheet.Row(2);
```



Obr. 16 - Grafy aplikace

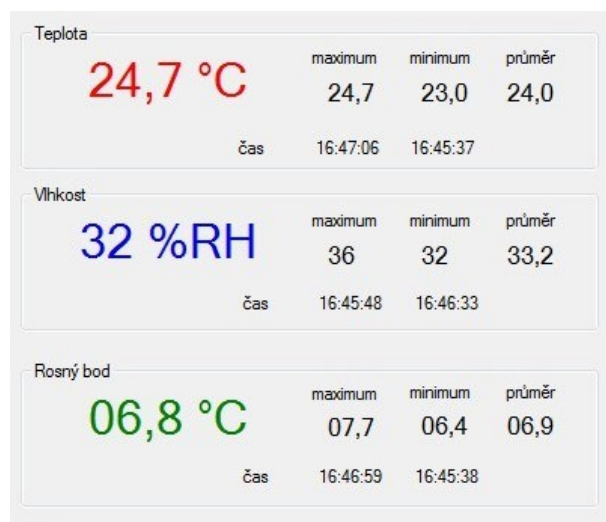
Zobrazování grafu se spouští spolu se záznamem hodnot do excelového souboru, grafy jsou rozděleny na společný, kde jsou všechny křivky společně a barevně jsou odlišeny. Rozdělení je do společné škály, jelikož 3 škály by byly nepřehledné a prakticky se všechny hodnoty pohybují ve stejném rozmezí. Pro lepší přehlednost byla vytvořena i záložka „jednotlivé grafy“ pro každou hodnotu zvlášť. Jak lze vidět v popisu grafu, není určená jednotka času, jelikož časová základna grafu lze nastavit pomocí přepínačů nad grafy a to na 2min, 10min, 1hod a 1 den.

Všechny parametry grafů se nastavují ve funkci **CreateGraph**, která je také v souboru Grafy.cs. Nastaví titulek grafu na „teplota“ popis osy Y na „°C“ nastaví minimum na -30 a maximum na 80.

```
CreateGraph(zedGraph1, "teplota", "°C", -30, 80);
```

Funkce grafu jsou součástí pluginu ZedGraph, které jsou již naprogramované. ContextMenu (klik pravým tlačítkem myši v oblasti grafu) nám nabízí:

- Copy – kopírování grafu
- Save Image As – uložit jako obrázek ve zvoleném formátu
- Page Setup – nastavení stránky pro tiskárnu
- Print – dialog pro tisk
- Show Point values – ukazuje hodnoty pro najetí na křivku grafu
- Un Zoom – vrátí poslední zvětšení
- Undo all zoom/pan – vrátí všechny změny do původního nastavení
- Set Scale To Default – nastaví měřítko na ideální pro využití plochy grafů



Obr. 17 - Měření teploty, vlhkosti a výpočet rosného bodu

Rozmezí pro měření teploty bylo nastaveno od -30 °C do +80 °C a to s přesností 0,1. Pro vlhkost byla nastavená hodnota od 0 % RH do 100 % RH a s přesností 1%. Přesnost pro rosný bod je 0,1 % a hodnota od 0 do 50 °C. Výpočty pro teplotu a vlhkost byly použity vzorce z datasheetu přímo od výrobce senzoru SHT21 a byly implementovány do programu. Vstupem pro výpočet rosného bodu je teplota a relativní vlhkost, pro výpočet byl použit vzorec z webové stránky wikipedia (viz. [19]), jehož vzorec obsahuje empiricky stanovené hodnoty, dle výzkumu NOAA je za běžných podmínek přesnost výsledků do 1%. Při spuštění záznamu těchto hodnot v reálném čase také program určuje maximální, minimální a průměrnou hodnotu, a také zobrazí, v jakém čase nastala. Tyto hodnoty mimo jiné jsou ukládány také do excel souboru a vykreslovány do grafu.

Výpočet pro teplotu:

$$T = -46.85 + 175.72 * \frac{S_T}{2^{14}} \quad [8]$$

Výpočet pro vlhkost:

$$RH = -6 + 125 * \frac{S_{RH}}{2^{12}} \quad [8]$$

Výpočet pro rosný bod:

$$T_{DP} = \frac{243,5 \ln\left(\frac{RH}{100} * e^{\frac{17,67*T}{243,5+T}}\right)}{17,67 - \ln\left(\frac{RH}{100} * e^{\frac{17,67*T}{243,5+T}}\right)} \quad [25]$$

$S_T$  jsou přijatá data ze senzoru při měření teploty vzduchu.  $S_{RH}$  je hodnota dat ze senzoru při měření relativní vlhkosti vzduchu.  $T$  je výsledná teplota ve stupních Celsia.  $RH$  je relativní vlhkost vzduchu uvedená v procentech.  $T_{DP}$  je výsledná hodnota rosného bodu ve stupních Celsia, pomocí vypočtené relativní vlhkosti a teploty vzduchu.

Kód zápisu:

```
//vypočet teploty a vlhkosti
public void CalcTRH(double temp, double humi)
{
    double rh = humi; // rh: Humidity [Ticks] 12 Bit
    double t = temp; // t:Temperature [Ticks] 14 Bit
    double t_C = -46.85 + 175.72 * t / 16384.0;
    double rh_true = rh / 4096 * 125 - 6;
    m_Humidity = Math.Round(rh_true, 0); //return humidity[%RH]
    m_Temperature = Math.Round(t_C, 1); //return temperature [°C]
    pomocna1 = (17.67 * t_C) / (243.5 + t_C); //pomocný výpočet 1
    pomocna2 = (rh_true / 100) * Math.Pow(Math.E, pomocna1); //pomocný výpočet 2
    m_DewPoint = Math.Round((243.5 * Math.Log(pomocna2)) / (17.67 -
Math.Log(pomocna2)), 1);
}
```



Obr. 18 - Hlavní okno PC aplikace

## 6 Provedení měření a testů

Testovací měření bylo provedeno v laboratoři Vysoké školy báňské - Technické univerzity za pomoci dvou přístrojů, které jsou součástí vybavení laboratoře. Měření probíhalo na referenčním teploměru Fluke – 1523 a Voltcraft měřiči parametrů prostředí s označením DT – 8820. Oba tyto přístroje dokáží měřit teplotu okolního prostředí, kde se značně liší jejich přesnost měření (hystereze). Měření bylo porovnáváno s počítačovou aplikací, která byla vytvořena v programu Visual Studio pro zařízení Sensirion EK-H5, kde prioritní byla hodnota teploty, a také v menší míře měření vlhkosti pomocí přístroje Voltcraft. S naměřených výsledku vizualizační program dokáže vypočítat rosný bod okolního prostředí.



Obr. 19 - Fluke-1523 a Voltcraft DT-8820

### 6.1 Referenční teploměr Fluke 1523

Tento přenosný přístroj nám nabízí vysokou přesnost, široký rozsah měření a funkci záznamu dat s projekcí vývoje. Maximální přesnost je zaručena paměťovým čipem umístěným v konektoru sondy, který pro účely odečtu poskytuje informace o kalibraci. Typ s označením Fluke 1523 nabízí jednokanálové měření a zaznamenává tři typy snímačů v jediném přístroji. Podporuje PRT,RTD, termočlánků a termistorů zajišťující flexibilitu pro volbu správné sondy pro daný úkol. Díky speciálním přesným odporům a vysoce stabilnímu zdroji referenčního napětí je přesnost modelů 1523 téměř nezávislá na teplotě okolí. Přesnost typu PRT je  $\pm 0,011\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde tato přesnost bude využívána pro srovnávací měření s vytvořenou vizualizační aplikací pro zařízení Sensirion EK-H5 ze senzorem SHT21.



Obr. 20 - Referenční teploměr 1523 a PC aplikace

**Tabulka 2 - Specifikace referenčního teploměru Fluke 1523**

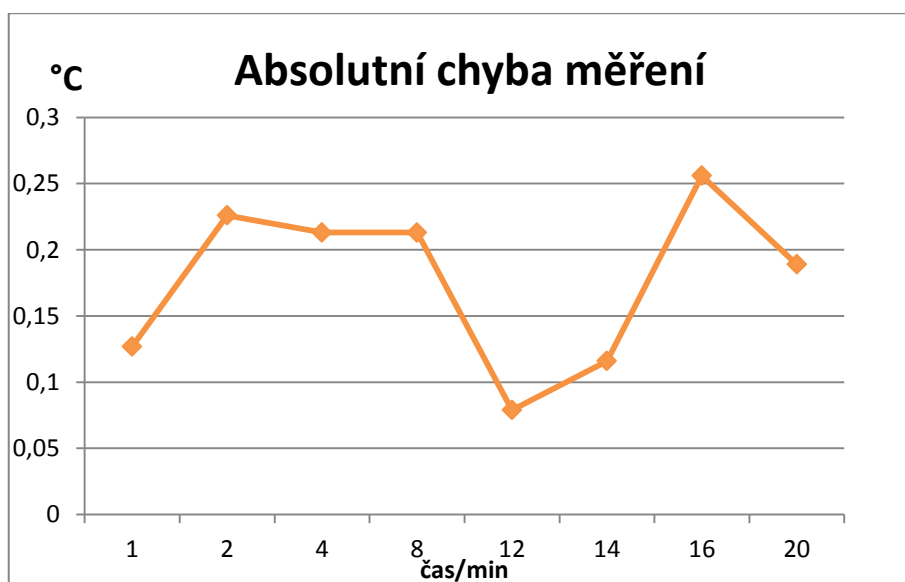
Fluke 1523	
Vstupní kanály:	1
Záznam dat:	25 odečtů se statistikou
Vzorkovací interval (normal):	1s
Vzorkovací interval (rychlý režim):	0,3 s
Provozní teplota:	- 10 °C až 60 °C (optimální 13 °C až 33 °C)
Typy snímačů:	PRT, RTD, termistory a termočlánky
Typy termočlánků:	C,E,J,K,L,M,N,T,U,B,R,S C,E,J,K,L,M,N,T,U,B,R,S
Milivoltový rozsah a přesnost:	- 10 mV až 75 mV ± (0,005 % + 5 μV)
Rozsah odporu a přesnost:	0 Ω až 400 Ω ± (0,004 % + 0,002 Ω)
	200 Ω až 50 kΩ ± (0,01 % + 0,5 Ω)
	50 kΩ až 500 kΩ ± (0,03 %)
Budicí proud, odpor:	1 mA (0 Ω až 400 Ω)
	10 μA (0 Ω až 50 kΩ)
	2 μA (50 kΩ až 500 kΩ)
Teplotní rozsah, rozlišení - termočlánek:	-200 °C až 2315 °C; 0,01°; ±0,24 °C
Teplotní rozsah, rozlišení - PRT a RTD:	-200 °C až 1000 °C; 0,001°; ±0,011 °C
Teplotní rozsah, rozlišení - termistor:	-50° C až 150 °C; 0,001° ; 0,002 °C



Při měření s referenčním teploměrem 1523, byla porovnávaná teplota v laboratoři s vytvořeným vizualizačním programem pro senzor SHT21. Po zapojení sondy do měřicího přístroje byla nastavena hodnota na stupně celsia. Na měřicím přístroji jsou zobrazovány hodnoty na tisíciny. Ve vizualizační aplikaci pro senzor SHT21 jsou hodnoty zobrazovány na desetiny. Tyto hodnoty s kalibračního přístroje byly velice totožné vytvořenému programu pro senzor SHT21, odchylka byla minimální a ta činila  $\pm 0,3$  °C, pokud nedošlo k rychlému extrémnímu vychýlení a určitých chyb měření. Měření bylo prováděno ve 20 minutovém intervalu v laboratoři, kde teplota na obou přístrojích se nějak zásadně neměnila, jak lze vidět v tabulce č. 3. Při každém měření vznikají určité chyby. Jen v případech zcela teoretických lze jednotlivým měřením zjistit skutečnou hodnotu s absolutní přesností, proto také byla vypočtená absolutní a relativní chyba měření.

**Tabulka 3 - Měření teploty v laboratoři s SHT21 a Fluke 1523**

Měření v laboratoři - teplota				
Čas/min	Fluke 1523	SHT21	$\Delta = A - a$	$\delta = \Delta / a ( \cdot 100 \%)$
1 min.	22,973 °C	23,1 °C	$\pm 0,1$ °C	$\pm 0,5\%$
2 min.	23,274 °C	23,5 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,9\%$
4 min.	23,187 °C	23,4 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,9\%$
8 min.	23,387 °C	23,6 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,9\%$
12 min.	23,221 °C	23,3 °C	$\pm 0,1$ °C	$\pm 0,3\%$
14 min.	23,084 °C	23,2 °C	$\pm 0,1$ °C	$\pm 0,5\%$
16 min.	23,144 °C	23,4 °C	$\pm 0,3$ °C	$\pm 1,1\%$
20 min.	22,911 °C	23,1 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,8\%$



*Graf 1 – Absolutní chyba měření teploty v laboratoři*



V tabulce č. 4 byl realizován dynamický test, kde senzory teploty SHT21 a senzor měřicího přístroje Fluke 1523 byly vystrčeny ven z okna laboratoře a bylo pozorováno, kdy se tato teplota ustálí na obou senzorech. U referenčního teploměru Fluke 1523 se teplota ustálila do  $\pm 10$  vteřin, přičemž na senzoru SHT21 byla teplota ustálena do 2,5 minuty. Z tohoto měření plyne, že vizualizační aplikace pro senzor SHT21 nějakou dobu trvá, než se tato hodnota ustálí, ale jakmile se tato hodnota teploty ustálí, je přibližná referenčnímu teploměru Fluke 1523 s maximální odchylkou  $\pm 0,3$  °C.

**Tabulka 4 - Měření venkovní teploty z laboratoře**

Skoková venkovní hodnota senzorů				
Čas/min	Fluke 1523	SHT21	$\Delta = A - a$	$\delta = \Delta / a ( \cdot 100 \%)$
1 min.	12,198 °C	18,3 °C	$\pm 6,1$ °C	$\pm 50 \%$
2 min.	12,782 °C	14,7 °C	$\pm 1,9$ °C	$\pm 15 \%$
3 min.	12,554 °C	12,8 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 1 \%$
8 min.	11,889 °C	12,2 °C	$\pm 0,3$ °C	$\pm 2 \%$
12 min.	12,112 °C	12,3 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 1,5 \%$
14 min.	12,084 °C	12,4 °C	$\pm 0,3$ °C	$\pm 2,6 \%$
16 min.	12,911 °C	12,6 °C	$\pm 0,3$ °C	$\pm 2,4 \%$
20 min.	13,221 °C	13,0 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 1,6 \%$



*Graf 2 - Absolutní chyba teploty venkovního měření*

## 6.2 Voltcraft DT – 8820

Měřicí přístroj Voltcraft s označením DT-8820, je zařízení s měřením úrovně zvukové hladiny, teploměru a vlhkoměru. Výrobce uvádí teplotní rozsah od -20 °C do +750 °C, kde základní přesnost je  $\pm 3\%$  u měření teploty je přesnost  $\pm 1$  °C. Měření relativní vlhkosti vzduchu v oblasti od 25% do 95%, kde přesnost je  $\pm 5\%$ . Oproti měřicímu přístroji Fluke 1523, tento přístroj byl použit jako orientační měření, jelikož není až tak přesný, neboť výrobce uvádí, že přístroj lze pro měření teploty a vlhkosti použít pro domácí měření a proto není vhodný pro profesionální měření. Pro nejlepší měření pomocí přístroje Voltcraft je uvedeno, když přístroj bude ponechán 6 minut v klidu v měřeném prostředí, proto skoková hodnota našeho měření (vystrčení senzoru z okna laboratoře) nelze určit, jelikož přístroj na změnu teploty a vlhkosti měření nereagoval až po cca 6 minutách.

**Tabulka 5 - Měření teploty pomocí Voltcraft DT-8820 a senzoru SHT21**

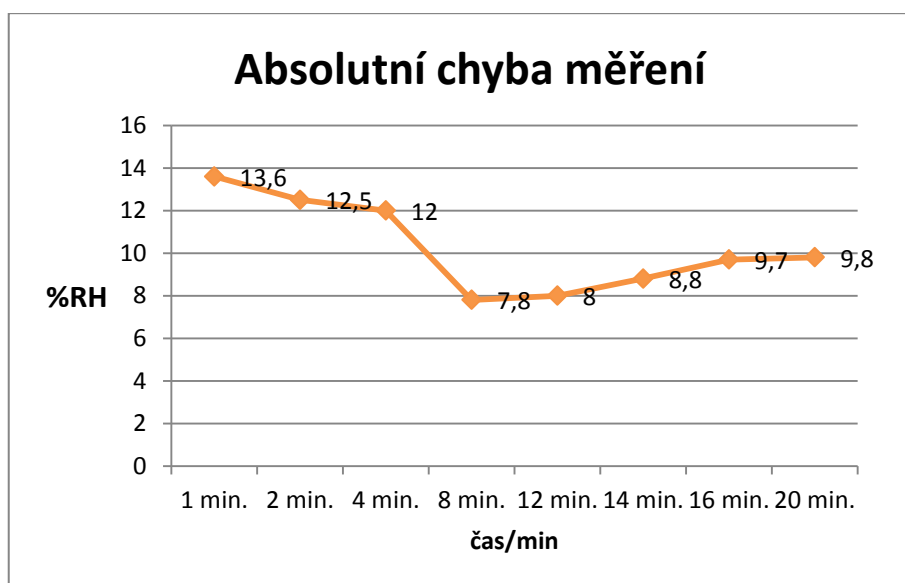
Měření v laboratoři - teplota				
Čas/min	Voltcraft DT-8820	SHT21	$\Delta = A - a$	$\delta = \Delta / a ( \cdot 100 \%)$
1 min.	28,5 °C	24,8 °C	$\pm 3,7$ °C	$\pm 13 \%$
2 min.	28,5 °C	25,4 °C	$\pm 3,1$ °C	$\pm 11 \%$
4 min.	28,5 °C	26,3 °C	$\pm 2,2$ °C	$\pm 8 \%$
8 min.	29,1 °C	25,7 °C	$\pm 3,4$ °C	$\pm 12 \%$
12 min.	28,8 °C	24,9 °C	$\pm 3,9$ °C	$\pm 14 \%$
14 min.	28,9 °C	24,6 °C	$\pm 4,3$ °C	$\pm 15 \%$
16 min.	28,8 °C	23,9 °C	$\pm 4,9$ °C	$\pm 17 \%$
20 min.	28,8 °C	24,4 °C	$\pm 4,4$ °C	$\pm 15 \%$

Jak je patrné z tabulky č. 5, měření přístrojem DT-8820 nebylo až tak přesné, jako s přístrojem Fluke 1523. Největší možná absolutní chyba dosahovala  $\pm 4,9$  °C a největší možná poměrná (relativní) chyba je přibližně  $\pm 12,982 \%$ . Tato chyba mohla být způsobena nepřesným a nekalibrovaným přístrojem, nebo také nepříznivými vnějšími vlivy, jakož jsou mokrá nebo vysoká vlhkost vzduchu, silné vibrace, silná magnetická pole v blízkosti přístrojů a reproduktorů popř. elektrostatická pole.

**Tabulka 6 - Měření vlhkosti pomocí Voltcraft DT-8820 a senzoru SHT21**

Měření v laboratoři - vlhkost				
Čas/min	Voltcraft DT-8820	SHT21	$\Delta = A - a$	$\delta = \Delta / a ( \cdot 100 \%)$
1 min.	30,4 %RH	44 %RH	$\pm 13,6$ %RH	$\pm 45$ %
2 min.	32,4 %RH	45 %RH	$\pm 12,5$ %RH	$\pm 39$ %
4 min.	34,0 %RH	46 %RH	$\pm 12,0$ %RH	$\pm 36$ %
8 min.	36,2 %RH	44 % RH	$\pm 7,8$ %RH	$\pm 22$ %
12 min.	34,0 %RH	42 %RH	$\pm 8,0$ %RH	$\pm 24$ %
14 min.	34,2 %RH	43 %RH	$\pm 8,8$ %RH	$\pm 26$ %
16 min.	34,3 %RH	44 %RH	$\pm 9,7$ %RH	$\pm 28$ %
20 min.	34,2 %RH	44 %RH	$\pm 9,8$ %RH	$\pm 29$ %

Měřicím přístrojem DT-8820 byla také měřená vlhkost okolního prostředí laboratoře a posuzovaná, jak se liší oproti vytvořenému vizualizačnímu programu pro senzor SHT21. Největší možná absolutní chyba byla  $\pm 13,6$  %RH a největší možná poměrná (relativní) chyba je přibližně  $\pm 45$  %. Z tohoto můžeme posoudit, že měření bylo velmi nepřesné, kde v osmé minutě měření docházelo k zlepšení přesnosti měření, ale výrobce uvádí, že maximální odchylka dosahuje  $\pm 5\%$  pro zařízení Voltcraft DT-8820. V našem případě mezi porovnávanými senzory je rozdíl téměř 13,6 %RH (výrobce SHT21 udává maximální přesnost  $\pm 2\%$  RH). K nepřesnému měření mohlo dojít špatným kalibrovaným přístrojem i také velkou odchylkou přístroje. Nelze vyloučit také chybu experimentátora a nedostatečným časem měření pro ustálení hodnot. Menší zlepšení můžeme pozorovat při zanechání přístroje v klidovém režimu po osmi minutách měření, kde se tato hodnota snížila na  $\pm 7,8$  % RH. Při vystrčení senzoru z okna laboratoře se na senzoru SHT21 hodnota vlhkosti ustálila do 2,5 minut, měřicí přístroj DT-8820 nereagoval na změnu po třech minutách měření.



*Graf 3 - Absolutní chyba měření vlhkosti v laboratoři*

## 7 Zhodnocení výsledků měření.

Tématem této práce bylo vytvoření a navrhnutí vizualizační aplikace pro modul Sensirion EK-H5, kde aplikace dokáže zaznamenávat přesné měření teploty, vlhkosti a rosného bodu. V další části také porovnání výsledků s laboratorními přístroji pro měření teploty a vlhkosti.

Z výše uvedených faktů vyplývá, že toto zařízení Sensirion EK-H5 lze využívat spolu s vizualizační aplikací pro přesné měření teploty v laboratořích, jelikož při porovnávání s referenčním teploměrem od společnosti Fluke s označením 1523, kde přesnost tohoto přístroje dosahuje přibližně  $\pm 0,011$  °C, se výsledky měření s posuzovaným senzorem SHT21 lišily maximálně o  $\pm 0,3$  °C, kde výrobce uvádí přesnost senzoru  $\pm 0,3$  °C. Relativní chyba tohoto měření dosahovala maximálně 1,1 %, což je velice adekvátní vůči odchylce senzoru SHT21. Měření bylo prováděno ve 20 minutovém intervalu v laboratoři Vysoké školy báňské.

Při dynamickém testu měření, byla testována teplota, při jaké rychlosti se ustálí na obou senzorech. Ve vizualizačním programu byla nastavená hodnota měření na 1 sekundu. Na přístroji Fluke 1523 se teplota ustálila do  $\pm 10$  vteřin, přičemž měření se senzorem SHT21 se hodnota ustálila do 2,5 minuty, jak lze vidět v tabulce č. 4. Čidlo každou sekundu posílá hodnoty do vytvořené vizualizační aplikace, ale jeho zobrazení je o něco pomalejší, to může být způsobeno pomalejším zpracováním dat přes I2C rozhraní, pokud tedy dojde k rychlé změně teploty okolního prostředí. Závěrem tohoto měření jsme dosáhli maximálního vychýlení  $\pm 0,3$  °C, což odpovídá maximální odchylce senzoru SHT21.

Testování s přístrojem Voltcraft s typovým označením DT-8820 nelze zaručit jeho správnou činnost. Měřené hodnoty na přístroji Fluke a v aplikaci pro SHT21 se značně lišily oproti přístroji Voltcraft. Přesnost tohoto senzorů pro teplotu je uváděna  $\pm 1$  °C, což v našem měření s porovnáním se senzorem SHT21 odchylka dosahovala až  $\pm 4,9$  °C. U vlhkosti výrobce uvádí, že přesnost senzoru je  $\pm 5\%$  v našem případě dosahovala odchylka  $\pm 13,6$  % RH. Výrobce taky uvádí, že přístroj lze pro měření teploty a vlhkosti použít pro domácí měření a proto není vhodný pro profesionální měření. Skoková hodnota obou senzorů nemohla být změřena, jelikož pro nejpřesnější měření s přístrojem voltcraft, musí být přístroj v klidu ponechán 6 minut v měřeném prostředí, proto skoková hodnota našeho měření nelze určit. Přístroj reagoval na změnu prostředí (jak teploty, tak vlhkosti) cca po 6 minutách. K nepřesnému měření mohlo dojít špatným kalibrovaným přístrojem i také velkou odchylkou na vlhkost. Nelze vyloučit také chybu experimentátora a nedostatečným časem měřením pro ustálení hodnot.

Vzorec pro výpočet rosného bodu byl implementován do projektu. Za pomoci teploty a relativní vlhkosti lze určit hodnotu rosného bodu.

## Použitá literatura

- [1] ČERNÝ, RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 8001031233.
- [2] BRZOBOHATÝ Lukáš: Měření teploty. Brno, 2011. 19s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [3] BENEŠ, Jiří, Jaroslava KYMPLOVÁ a František VÍTEK. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-4712-5.
- [4] Smutný: Vlhkost, <http://fs1.vsb.cz>
- [5] HUSÁK, Miroslav. *Senzory v lékařství: návody k laboratorním cvičením*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 9788001036112.
- [6] *Akcelerometry: 3D MEMS* [online]. [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://vyuka.eparo.cz/isame/Akcelerometry.pdf>.
- [7] Evaluation Kit EK-H5. *Sensirion* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/evaluation-kits-ek-h5/>
- [8] *SENSIRION: SHT21* [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/2\\_Humidity\\_Sensors/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT21\\_Datasheet.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT21_Datasheet.pdf)
- [9] Negastor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Negastor>
- [10] Pozistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pozistor>
- [11] CHLAD, M. *Bezdrátový senzor teploty a relativní vlhkosti vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Macháň.
- [12] Měření vlhkosti vzduchu. *Mladý meteorolog* [online]. [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://metmladez.wz.cz/metdeti/i05.htm>
- [13] Incubator thermometer and Hygrometer review and recommendation. In: *Backyardchickens* [online]. [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <https://www.backyardchickens.com/threads/incubator-thermometer-and-hygrometer-review-and-recomendation.965347/>
- [14] Humidity Measurement. In: *Encyclopedia.che.engin.umich.edu* [online]. Dostupné z: <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/ProcessParameters/HumidityMeasurement/HumidityMeasurement.html>
- [15] Vlhkost vzduchu: Mikroklima. *Cit.vfu.cz* [online]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/mikroklima/www/4%20Vlhkost.htm>

- [16] SVRČINA, Michal. *Měření a vizualizace biotelemetrických dat*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Marek Penhaker, Ph.D.
- [17] SHARP, John. *Microsoft Visual C# 2010: krok za krokem*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2010. Krok za krokem (Computer Press). ISBN 978-80-251-3147-3.
- [18] *Sběrnice I2C, o co jde a jak pracuje* [online]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/iic.htm>
- [19] Rosný bod. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Rosn%C3%BD\\_bod](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rosn%C3%BD_bod)
- [20] PLATIL, Antonín a Pavel RIPKA. *Senzory a převodníky: laboratorní cvičení*. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001028739.
- [21] IO-Warrior: Generic universal I/O Controller for USB. *Codemercs* [online]. 2013. Dostupné z: [https://www.codemercs.com/downloads/iowarrior/IOW24\\_40\\_Datasheet.pdf](https://www.codemercs.com/downloads/iowarrior/IOW24_40_Datasheet.pdf)
- [22] Referenční teploměry 1523/1524. *Fluke* [online]. Dostupné z: <http://fluke.informationstore.net/efulfillment.asp?publication=11494-cze>
- [23] CHMELAŘ, M., A. DRASTICH a J. ROZMAN. *Lékařská přístrojová technika 2*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1984. 179 s.
- [24] PEREZ, Reinaldo. *Design of medical electronic devices*. San Diego: Academic Press, c2002, xi, 279 s. ISBN 0-12-550711-9
- [25] Weather Prediction center: Dew point calculation. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Dostupné z: <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/dewrh.shtml>

## Seznam příloh

Všechny následující přílohy se nalézají na přiloženém CD. Jedná se o soubory, jež byly použity při konstrukci aplikace, testování, měření a vykreslování dat.

Příloha I: Aplikace\_SHT21.zip – Navrhnutá aplikace v Microsoft Visual Studiu C#

Příloha II: Spustit\_SHT21.exe – Instalační program pro modul Sesirion EK-H5

Příloha III: Form1.cs – nejdůležitější zdrojový kód aplikace

Příloha IV: datasheets\_SHT21.pdf – Datasheets senzoru SHT21 v Anglickém jazyce

Příloha V: Presne\_mereni\_teploty\_a\_vlhkosti.pdf – tato práce v elektronické podobě